



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Présentée et soutenue par :

Adrien Datas

le mardi 9 juillet 2013

Titre :

Analyse et simulation de mouvements d'atteinte contraints en position et orientation pour un humanoïde de synthèse

École doctorale et discipline ou spécialité :

EDSYS : Automatique, Signal, Productique, Robotique

Unité de recherche :

EA 1905 LGP - Laboratoire Génie de Production

Directeur(s) de Thèse :

FOURQUET Jean-Yves et CHIRON Pascale

Jury :

Mr BAYLE Bernard, Professeur des Universités, Rapporteur

Mr GUIGON Emmanuel, Chargé de recherche CNRS, Rapporteur

Mr SOUERES Philippe, Directeur de la recherche CNRS, Examineur

Mr PADOIS Vincent, Maître de conférences, Examineur

Mr FOURQUET Jean-Yves, Professeur des Universités, Directeur de thèse

Mme CHIRON Pascale, Maître de conférences, Directrice de thèse

Table des matières

Remerciements	22
Introduction	25
1 Problématique	27
1.1 Description, analyse et visualisation des mouvements humains	27
1.1.1 Le squelette humain : généralités	27
1.1.2 Constituants d’une articulation	29
1.1.3 Ensemble des mouvements articulaires	29
1.1.3.1 Les plans de référence	30
1.1.3.2 Les mouvements produits	30
1.1.3.3 Les articulations complexes	30
1.1.4 Le mouvement humain	34
1.2 Modélisation de l’humain	36
1.2.1 Les mannequins numériques	37
1.2.1.1 Modélisation avec liaisons pilotables	37
1.2.1.2 Modélisation musculo-squelettique	39
1.2.1.3 Modélisation des éléments complexes	40
1.2.2 Modélisation de l’enveloppe externe	41
1.3 Techniques d’animation des humanoïdes	42
1.3.1 La génération de mouvement	42
1.3.2 Techniques de rejeu associées à la capture de mouvement	43
1.3.2.1 Système d’enregistrement du mouvement	44
1.3.2.2 Méthodes de rejeu	45
1.3.3 Discussion	47
1.4 Méthodes d’analyse des postes de travail	48
1.4.1 Analyse ergonomique	48
1.4.2 L’évaluation de l’ergonomie	49
1.4.3 L’utilisation des opérateurs virtuels	50
1.5 Conclusion	51
2 Modélisation	53
2.1 Modélisation de la tâche	54
2.2 Situation d’un solide	55
2.2.1 Paramètres de position	55
2.2.2 Paramètres d’orientation	55
2.2.3 Représentation de la situation d’un solide	56
2.2.3.1 Matrices de transformation homogène	56

2.2.3.2	Paramètres d'orientation	56
2.2.3.2.a	Systèmes de 3 angles indépendants	56
2.2.3.2.b	Représentation à 4 paramètres	57
2.2.3.2.c	Les quaternions	58
2.2.3.2.d	Représentation de la situation	59
2.2.4	Définition de la tâche : contraintes explicites et implicites	59
2.2.5	Synthèse	60
2.3	Modélisation de l'humain	60
2.3.1	Modélisation statique	60
2.3.1.1	Anthropométrie	61
2.3.1.1.a	Squelette	61
2.3.1.1.b	Enveloppe extérieure	61
2.3.1.2	Propriétés massiques	62
2.3.1.2.a	Masse des corps	62
2.3.1.2.b	Inertie des corps	63
2.3.2	Modélisation cinématique	63
2.3.2.1	Modélisation des complexes articulés	64
2.3.2.1.a	Colonne vertébrale	65
2.3.2.1.b	Cou	66
2.3.2.1.c	Epaule	66
2.3.2.1.d	Coude	66
2.3.2.1.e	Poignet	68
2.3.3	Paramétrage du mannequin	68
2.4	Relation entrées-sorties : le modèle cinématique direct	69
2.4.1	Manipulabilité, conditionnement et singularités	70
2.4.2	Décomposition en valeurs singulières	71
2.4.3	Manipulabilité directionnelle	72
2.5	Modélisation du mouvement	72
2.5.1	Définition du problème	73
2.5.2	Trajectoires et géodésiques	73
2.5.2.1	Chemins dans l'espace Euclidien	74
2.5.2.1.a	Géodésiques et distances en translation	74
2.5.2.1.b	Mesure de l'écart à la ligne droite	74
2.5.2.1.c	Index de linéarité	75
2.5.2.2	Une métrique pour mesurer les rotations	76
2.5.2.2.a	Géodésiques et distances dans $SO(3)$	76
2.5.2.2.b	Evolution sur la géodésique	77
2.5.2.2.c	Mesure de l'écart à la géodésique en rotation	77
2.5.2.2.d	Choix de représentation et visualisation des rotations	78
2.5.3	Profil temporel	81
2.5.3.1	Contraintes, optimisation et lois de temps	82
2.5.4	Synthèse	84
2.6	Conclusion	84
3	Expérimentations	85
3.1	Données bibliographiques sur le mouvement d'atteinte	85
3.2	Définition du cadre expérimental	87
3.2.1	Capture de mouvements et conditions expérimentales	87
3.3	Mouvements contraints en position	89
3.3.1	Protocole de mesure	89

3.3.2	Observations	90
3.4	Mouvement contraint en rotation	95
3.4.1	Discussion	96
3.5	Mouvement avec contraintes couplées	97
3.5.1	Protocole de mesure	97
3.5.2	Observations : Trajectoires spatiales en translation	98
3.5.3	Observations : Trajectoires spatiales en rotation	99
3.5.4	Observations : Synthèse trajectoires spatiales	104
3.5.5	Observations : Profil temporel	104
3.5.6	Observations : Synchronisation temporelle	105
3.5.7	Discussion	110
3.6	Conclusion	111
4	Schéma de contrôle	113
4.1	Introduction	113
4.2	Modèle cinématique inverse	114
4.2.1	Solutions de norme minimale, pseudo-inverse(s)	114
4.2.2	Tâches prioritaires, contraintes explicites et implicites	115
4.3	Pondération par l'inertie	116
4.4	Adaptation de la consigne opérationnelle : filtrage	118
4.4.1	Pseudo-inversion et valeurs singulières	118
4.4.2	Régularisation	119
4.4.3	Filtrage	120
4.4.4	Pondération et filtrage du modèle cinématique	120
4.5	Priorisation ou pondération de critères	120
4.5.1	Les schémas de pseudo-inversion	121
4.5.2	Formulation de la pile de tâche	121
4.5.3	Formulation générale du problème	122
4.6	Calcul des consignes	123
4.6.1	Consignes liées à la main	123
4.6.1.1	Aspects temporels	123
4.6.2	Consignes liées au regard	125
4.6.3	Respect des amplitudes articulaires	126
4.6.3.1	Principe général	126
4.6.4	Contrainte d'auto-collision	128
4.6.5	Ajustement vers une posture de référence	131
4.7	Conclusion	132
5	Validation du modèle	133
5.1	Introduction	133
5.2	Outil logiciel OLARGE TMS	133
5.2.1	Structure du logiciel	133
5.2.2	Fonctionnement et utilisation d'OLARGE-TMS	134
5.3	Imitation du mouvement humain	137
5.3.1	Principe utilisé	138
5.3.2	Schéma d'imitation du geste	139
5.4	Analyse des mouvements de l'appareil locomoteur passif	141
5.4.1	Mouvement avec contrainte de positionnement seule	141
5.4.1.1	Analyse avec un modèle cinématique global	142
5.4.1.2	Analyse à l'aide du schéma priorisé	142

5.4.1.3	Discussion	142
5.4.2	Mouvement avec contrainte de positionnement et d'orientation	144
5.4.2.1	Cas du modèle cinématique global	145
5.4.2.2	Analyse via le système de priorisation	145
5.4.2.2.a	Valeurs singulières en translation	145
5.4.2.2.b	Valeurs singulières en rotation	147
5.4.3	Bilan sur les mouvements internes de la chaîne articulée	148
5.5	Procédure de réglage	149
5.5.1	Paramètres réglables du schéma	149
5.5.2	Processus de réglage	150
5.5.3	Etape 1 : réglage de la sous-tâche pour la translation de la main	150
5.5.4	Etape 2 : réglage de la sous-tâche pour la rotation de la main	151
5.6	Simulation du geste avec contrainte de positionnement de la main	151
5.6.1	Protocole et paramètres initiaux	152
5.6.2	Paramétrisation du schéma en translation	153
5.6.3	Profil temporel de la main en translation	157
5.6.4	Synthèse	157
5.7	Simulation avec contraintes de positionnement et d'orientation	159
5.7.1	Validation des réglages liés à la translation	159
5.7.2	Réglages de la sous-tâche de rotation de la main	162
5.7.3	Trajectoires spatiales	163
5.7.4	Profil temporel	170
5.7.5	Conclusion	170
5.8	Validation du modèle	172
5.8.1	Reproductibilité du geste	172
5.8.1.1	Répétitivité sous contrainte de positionnement	173
5.8.1.2	Contraintes en position et orientation	173
5.8.2	Etude d'un nouveau mouvement plan	174
5.9	Conclusion	180
Conclusion		187
Bibliographie		200
Définition des symboles		202
DOCUMENT ANNEXE		5
A Convention de Denavit Hartenberg		5
A.1	Modèle géométrique direct	5
A.2	Placement des repères	5
A.3	Extraction des paramètres	6
A.4	Codification de notre mannequin	6
A.5	Matrice de transformation homogène associée	8
A.6	Définition des organes terminaux	8
B Résultats d'expérience avec contrainte de positionnement		11
B.1	Trajectoire spatiale de la main dans l'espace de la tâche	12
B.2	Valeur de déformation LI pour la trajectoire spatiale	13
B.2.1	Durée des mouvements pour chacun des sujets	14

C	Résultat d'expérience avec contraintes couplées	15
C.1	Visualisation des trajectoires en translation	16
C.2	Valeur de déformation LI	17
C.3	Visualisation des trajectoires en rotation	18
C.3.1	Trajectoires du mouvement 1	18
C.3.2	Trajectoires du mouvement 2	23
C.3.3	Trajectoires du mouvement 3	28
C.3.4	Trajectoires du mouvement 4	33
C.3.5	Trajectoires du mouvement 5	38
C.3.6	Trajectoires du mouvement 6	43
C.3.7	Trajectoires du mouvement 7	48
C.4	Valeur de déformation DI	53
C.5	Erreur maximale en rotation	54
C.6	Erreur moyenne en rotation	55
C.7	Profil temporel en translation	56
C.7.1	Profil temporel du mouvement 1 pour chacun des sujets	56
C.7.2	Profil temporel du mouvement 2 pour chacun des sujets	57
C.7.3	Profil temporel du mouvement 3 pour chacun des sujets	58
C.7.4	Profil temporel du mouvement 4 pour chacun des sujets	59
C.7.5	Profil temporel du mouvement 5 pour chacun des sujets	60
C.7.6	Profil temporel du mouvement 6 pour chacun des sujets	61
C.7.7	Profil temporel du mouvement 7 pour chacun des sujets	62
C.8	Profil temporel en rotation	63
C.8.1	Profil temporel du mouvement 1 pour chacun des sujets	63
C.8.2	Profil temporel du mouvement 2 pour chacun des sujets	64
C.8.3	Profil temporel du mouvement 3 pour chacun des sujets	65
C.8.4	Profil temporel du mouvement 4 pour chacun des sujets	66
C.8.5	Profil temporel du mouvement 5 pour chacun des sujets	67
C.8.6	Profil temporel du mouvement 6 pour chacun des sujets	68
C.8.7	Profil temporel du mouvement 7 pour chacun des sujets	69
C.9	Durée des mouvements pour chacun des sujets	70
C.10	Synchronisation entre translation et rotation	71
C.10.1	Synchronisation temporel du mouvement 2 pour chacun des sujets	71
C.10.2	Synchronisation temporel du mouvement 3 pour chacun des sujets	72
C.10.3	Synchronisation temporel du mouvement 5 pour chacun des sujets	73
C.10.4	Synchronisation temporel du mouvement 6 pour chacun des sujets	74
C.10.5	Synchronisation temporel du mouvement 7 pour chacun des sujets	75
D	Résultat d'imitation du geste	77
D.1	Evolution des valeurs singulières pour une contrainte de position	78
D.1.1	Cas du modèle cinématique global	78
D.1.2	Cas de la pile de tâche	79
D.2	Evolution des valeurs singulières avec contraintes couplées	80
D.2.1	Cas du modèle cinématique global	80
D.2.2	Cas de la pile de tâche pour la translation	81
D.2.3	Cas de la pile de tâche pour la rotation	82
D.3	Résultat pour la validation	82
D.3.1	Trajectoire spatiale de la main dans l'espace de la tâche pour le mouvement en étoile	83
D.3.2	Mesure du déformation de la main pour le mouvement en étoile	84

Table des figures

1	Evolution du nombre de cas de TMS indemnisés pour le régime général et le régime agricole.	23
2	Illustration de la redondance de l'être humain : pour une même position de l'extrémité de la main droite, plusieurs postures sont possibles.	24
1.1	Les 6 différentes articulations synoviales [Online 12]	28
1.2	Composition d'une articulation [Zatsiorsky 98].	29
1.3	Les plans de référence de l'humain.	30
1.4	Ensemble des mouvements relatifs à la colonne vertébrale.	31
1.5	Ensemble des mouvements relatifs de l'articulation sterno-costo-claviculaire et de l'articulation acromio-claviculaire de l'épaule.	31
1.6	Ensemble des mouvements relatifs à l'articulation humérale de l'épaule.	31
1.7	Mouvement de flexion/extension du coude.	32
1.8	Ensemble des mouvements du poignet.	32
1.9	Ensemble des mouvements relatifs au cou.	32
1.10	Composition de la colonne vertébrale [Zatsiorsky 98].	33
1.11	Les différentes articulations de l'épaule. (1) articulation sterno-claviculaire, (2) articulation acromio-claviculaire, (3) articulation gléno-humérale, (4) articulation scapulo-serrato-thoracique, (5) articulation costo-sternale. Source : [Chaffin 06]	34
1.12	Disposition des trois articulations principales de l'épaule selon l'étude de Lindsay [Lindsay 01]. AC, SC et GH sont les abréviations respectivement des liaisons Acromio-Claviculaire, Sterno-Claviculaire, Gléno-Humérale.	34
1.13	Mouvement des deux os lors de la pronation issu de [Dufour 05].	35
1.14	Postures, non recommandée et recommandée, pour le soulevé de charge lourde [Park 74].	36
1.15	Illustrations de quelques modélisations par système robotique utilisant des liaisons pivots actives.	38
1.16	Le robot Nao possédant des paramètres dimensionnels proches de ceux d'un enfant de 8 ans.	39
1.17	Différents modèles de représentation utilisant squelette et muscles virtuels.	40
1.18	Modèle de l'épaule de Helm [Van Der Helm 94] à gauche et celui de Maurel [Maurel 98] à droite	41
1.19	Exemples d'interface pour l'enregistrement de mouvements.	44
1.20	Exemples d'interfaces capturant les mouvements humains.	45
1.21	Mannequin intermédiaire permettant de faire le lien entre l'être humain et l'humanoïde [Multon 08].	46
1.22	Processus d'imitation du mouvement de danse pour le robot HRP-2 [Nakaoka 05].	46
1.23	Comparaison entre les méthodes cinématique et dynamique pour le rejeu d'un mouvement d'atteinte [Saab 11].	47
1.24	Exemple de questionnaire relatif à l'analyse des opérations réalisées sur le poste de travail [Keyserling 93].	48
1.25	Exemple d'analyse posturale via le module Ergonomics Specialists de Delmia [Delmia 13].	50

2.1	Exemple d'une opératrice procédant au collage d'un filtre à air.	54
2.2	Schéma représentant la rotation d'un solide suivant 3 rotations successives autour des axes z , y et x	57
2.3	Table anthropométrique représentant la longueur de chaque segment en fonction de la hauteur totale (H) de la personne (issu de [Winter 90])	61
2.4	Représentation virtuelle de l'enveloppe du mannequin.	62
2.5	Disposition des masses associées à chacun des corps en fonction de la hauteur du mannequin.	63
2.6	Repère associé à chaque membre pour différencier les valeurs inertielles (issue de Chandler et al [Chandler 75]).	64
2.7	Schéma cinématique de la colonne vertébrale.	65
2.8	Classification des scores utilisés dans la méthode RULA pour qualifier l'angulation du buste dans le plan sagittal. Plus le score est élevé, plus la posture est pénalisante d'un point de vue ergonomique [McAtamney 93]	65
2.9	Schéma cinématique représentant l'articulation du cou.	66
2.10	Limites angulaires liées au cou issue de [McAtamney 93]. Selon la codification française OREGÉ [Aptel 00] et pour chaque mouvement, la figure de gauche représente la zone "acceptable" et la figure de droite représente la zone "non recommandée"	66
2.11	Modélisation du système d'articulation de l'épaule.	67
2.12	Schéma cinématique du coude.	67
2.13	Zone angulaire du coude. Selon la codification française OREGÉ [Aptel 00], la figure de gauche représente la zone "acceptable" et la figure de droite représente la zone "non recommandée".	67
2.14	Schéma cinématique lié au poignet du mannequin.	68
2.15	Exemple de zone articulaire pour le poignet. Selon la codification française OREGÉ [Aptel 00], la figure de gauche représente la zone "acceptable" et la figure de droite représente la zone "non recommandée".	69
2.16	Représentation géométrique de la relation entrée-sortie pour un système dans lequel $n = 3$ et $m = 2$	70
2.17	Manipulabilité d'un bras manipulateur plan qui évolue suivant la posture du système.	73
2.18	Calcul de la distance entre la géodésique et une autre trajectoire.	75
2.19	Exemple de deux trajectoires ayant la même valeur de $D_{r_{max}}$	75
2.20	Mesure de la déformation DI.	78
2.21	Visualisation de la direction de déformation d'une trajectoire en rotation.	79
2.22	Shéma récapitulant le dispositif de mesure de direction de déformation dans l'espace des rotations.	79
2.23	Exemple de direction de déformation.	80
2.24	Exemple de direction de déformation pour lequel la projection suivant le plan (x, y) produit un segment de norme nettement inférieure à 1.	80
2.25	Superposition du profil temporel (vert) sur la trajectoire spatiale (rouge).	81
2.26	Evolution de la position, vitesse et accélération d'une loi temporelle trapézoïdale.	82
2.27	Evolution de la position, vitesse, accélération et jerk d'un profil temporel de type minimum jerk.	83
3.1	Système ARTrack pour la capture de mouvement	88
3.2	Les marqueurs sont positionnés sur chaque sujet.	89
3.3	Positionnement du marqueur de la main.	89
3.4	Positionnement du marqueur du poignet.	90
3.5	Positionnement des marqueurs sur le bras (à gauche) et le buste de chaque sujet (à droite).	90
3.6	Contexte expérimental.	90
3.7	Exemple de trajectoires spatiales planes de la main pour les 4 essais du sujet 1.	91

3.8	Exemple de trajectoires spatiales planes de la main pour 3 sujets différents.	91
3.9	Représentation de la moyenne et de l'écart type de déformations de trajectoire pour chaque mouvement. Cas du mouvement sans contrainte d'orientation.	92
3.10	Profil temporel des mouvements de tous les sujets, pour tous les essais (en rouge minimum jerk). Cas du mouvement sans contrainte d'orientation. Les axes sont normés en abscisses et en ordonnées. L'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin accompli.	93
3.11	Représentation de la moyenne et de l'écart type de la durée de chaque mouvement. Cas du mouvement sans contrainte d'orientation.	94
3.12	Table utilisée lors de l'expérimentation d'un déplacement de la main en rotation. Cas du mouvement en rotation.	95
3.13	Visualisation du mouvement capturé par le biais de boîtes orientées. Le chemin géodésique est représenté par les boîtes en rouge. Cas du mouvement en rotation.	96
3.14	Profil temporel acquis (en rouge) comparé à la loi de référence (en noire, le "minimum jerk"). Cas du mouvement en rotation. Les axes sont normés, l'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin accompli.	96
3.15	Points à atteindre, cas de contraintes couplées.	97
3.16	Exemple de trajectoires spatiales planes de la main pour les 6 essais du sujet 3. Cas du mouvement avec contraintes couplées.	98
3.17	Trajectoires spatiales planes de la main pour quelques essais. Cas du mouvement avec contraintes couplées.	98
3.18	Moyenne et écart type de l'index de linéarité de chaque mouvement. Cas du mouvement avec contraintes couplées.	99
3.19	Courbe d'évolution de l'erreur (a) et des directions de déformation (b) pour l'ensemble des essais sur les 4 premiers mouvements.	101
3.20	Courbe d'évolution de l'erreur (a) et des directions de déformation (b) pour l'ensemble des essais sur les 3 derniers mouvements.	102
3.21	Moyenne et écart type de la valeur de déformation DI dans $SO(3)$ de chaque mouvement.	103
3.22	Moyenne et écart type de la durée de chaque mouvement.	105
3.23	Profil temporel des mouvements de tous les sujets dans l'espace \mathbb{R}^3 , pour tous les essais (en rouge minimum jerk). Les axes sont normés, l'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin parcouru.	106
3.24	Profil temporel des mouvements de tous les sujets dans l'espace $SO(3)$, pour tous les essais (en rouge minimum jerk). Les axes sont normés, l'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin parcouru.	107
3.25	Synchronisation temporelle pour un même sujet. La courbe rouge représente le profil temporel lié à la translation de la main. La courbe verte représente le profil temporel lié à la rotation de la main. Les axes sont normalisés entre 0 et 100%.	108
3.26	Synchronisation temporelle de différents essais et mouvements pris en exemple. La courbe rouge représente le profil temporel lié à la translation de la main. La courbe verte représente le profil temporel lié à la rotation de la main. Les axes sont normalisés entre 0 et 100%.	109
4.1	Calcul de l'inertie d'un corps par rapport à une liaison.	117
4.2	Pilotage du filtre grâce au paramètre λ	119
4.3	[Kulpa 05] Ensemble des solutions fournies par a) un schéma priorisé, b) un schéma global pondéré et c) un schéma global classique.	121
4.4	Schéma décrivant la procédure de calcul du point $i + 1$	124
4.5	Tracé du profil temporel inversé.	125
4.6	Définition des angles d'élévation et d'azimut.	126
4.7	Exemple d'un puit de potentiel répulsif.	127

4.8	Schéma illustrant le traitement de l'auto-collision avec deux corps C_1 et C_2	130
4.9	Illustration des solutions possibles fournies par le noyau de la sous-tâche d'évitement d'autocollision. Ces déplacements relatifs possibles entre les deux deux corps sont représentés par le plan P.	130
4.10	Exemple d'un gradient d'ajustement vers une posture de confort pour une articulation.	131
5.1	Visualisation à l'aide de l'outil logiciel OLARGE TMS.	134
5.2	Echange de données entre GDHE et Scilab. Le paramétrage du mannequin et de la séquence à jouer s'effectue sous GDHE. Les données sont ensuite transmises à Scilab qui génère à l'aide de notre schéma de contrôle, le mouvement du mannequin. Ce dernier renvoie finalement le geste simulé à GHDE qui peut animer le mannequin.	134
5.3	Aperçu des menus de définition du mannequin.	135
5.4	Aperçu du mobilier disponible sous OLARGE TMS.	136
5.5	Menu permettant la saisie du point devant être atteint par les mains	136
5.6	Changement de couleur des corps lorsque certaines articulations entrent dans des zones acceptables ou non recommandées.	137
5.7	Exemple de rapports permettant l'évaluation ergonomique d'un poste de travail. Chaque graphique représente le temps passé (en pourcentage) par l'articulation dans les différentes zones inconfortables et dangereuses.	137
5.8	La méthode de rejeu permet de reconstruire la posture du sujet capturé sur le mannequin. Par la suite, nous étudierons les capacités de déplacements de la chaîne cinématique à partir de l'évolution des variables articulaires obtenues avec cette méthode.	138
5.9	Exemple de simplification de l'orientation de l'avant-bras. La direction principale de l'avant-bras du sujet réel est reportée sur l'axe de révolution de l'avatar.	139
5.10	Niveau de priorité de chaque sous-tâche pour la méthode d'imitation du geste. Attention, la posture de référence est différente de la posture désirée. La posture de référence est un gradient qui permet au mannequin de rester près d'une posture de repos. Elle est utile dans le sens où le mouvement de l'épaule n'est pas acquis par notre système. Ce gradient permet de conserver l'épaule dans une configuration réaliste.	139
5.11	Algorithme du schéma d'imitation du mouvement à partir des données capturées.	140
5.12	L'analyse des mouvements de la chaîne articulée prend en paramètre d'entrée, l'évolution des variables articulaires issue de la méthode de rejeu.	141
5.13	Visualisation du troisième mouvement acquis pour une contrainte de translation obtenu par la méthode de rejeu.	141
5.14	Visualisation du sixième mouvement acquis pour une contrainte de translation obtenu par la méthode de rejeu.	142
5.15	A gauche : exemple de résultats de trois séquences réalisées par un seul sujet pour un modèle cinématique global. A droite : exemple de résultats d'une séquence réalisée par trois sujets pour un modèle cinématique global.	143
5.16	Profil d'évolution des valeurs singulières associées au déplacement de la main pour 4 sujets différents. La sous-tâche de déplacement de la main possède la priorité la plus forte.	144
5.17	Visualisation des mouvements 3 (à gauche) et 6 (à droite) par la méthode de rejeu.	145
5.18	Exemple de résultats de trois séquences réalisées par des sujets différents pour un modèle cinématique global.	145
5.19	Evolution des valeurs singulières pour la translation de la main lorsque le sujet est soumis à des contraintes de positionnement et d'orientation de celle-ci.	146
5.20	Evolution des valeurs singulières pour plusieurs niveaux de priorité de la sous-tâche associée à la translation de la main.	146
5.21	Evolution des valeurs singulières en rotation lorsque le sujet est soumis à des contraintes de positionnement et d'orientation de la main.	147

5.22	Evolution des valeurs singulières pour plusieurs niveaux de priorité de la sous-tâche associée à la rotation de la main.	148
5.23	Ensemble des sous-tâches classées par niveau de priorité. La priorité 1 étant la plus forte. . .	152
5.24	Ensemble des résultats du premier essai de comportement du modèle avec des réglages non optimisés dans le cas de la simulation d'un mouvement contraint en position.	153
5.25	Courbe de niveau représentant la mesure de déformation (LI) en fonction des valeurs de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$ pour le mouvement 3.	154
5.26	Courbe de niveau représentant la mesure de déformation (LI) en fonction des valeurs de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$ pour le mouvement 6.	155
5.27	Trajectoire spatiale de la main générée avec le schéma de génération automatique de mouvements réalistes	155
5.28	Simulation du troisième mouvement pour une contrainte de translation.	156
5.29	Simulation du sixième mouvement pour une contrainte de translation.	156
5.30	Comparaison de la mesure de déformation entre les résultats d'acquisition (en vert) et la simulation (en orange).	156
5.31	Profil temporel en translation de la main soumise à une contrainte de positionnement pour un mouvement simulé. La courbe rouge représente la référence (minimum jerk) tandis que la courbe noire montre l'évolution de la translation de la main au cours du temps.	158
5.32	Priorité données à l'ensemble des sous-tâches pour un mouvement contraint en position et orientation.	160
5.33	Trajectoire en translation de la main dans l'espace opérationnel pour des mouvements avec contraintes de positionnement et d'orientation de celle-ci.	160
5.34	Comparaison de la déformation de trajectoire entre les données acquise (en vert) et la simulation (en orange).	161
5.35	Evolution des valeurs singulières de la matrice jacobienne associée à la rotation de la main lorsque celle-ci se trouve en seconde position dans la pile de tâches (projetée dans le noyau de la sous-tâche du regard). La figure de gauche illustre un exemple représentatif de la population mesurée, le graphique de droite représente le résultat de la simulation.	161
5.36	Pilotage du filtre avec l'ajout d'un offset.	162
5.37	Courbe de niveau de la déformation DI en fonction des paramètres α_{Rotation} et $\lambda_{\text{Rotation}}$ pour le mouvement 3 avec un offset de 0,8.	163
5.38	Courbe de niveau de la déformation DI en fonction des paramètres α_{Rotation} et $\lambda_{\text{Rotation}}$ pour le mouvement 6 avec un offset de 0,8.	164
5.39	Simulation du troisième mouvement pour des contraintes couplées.	165
5.40	Simulation du sixième mouvement pour des contraintes couplées.	165
5.41	Profil temporel en translation (gauche) et rotation (droite) de la main pour un mouvement simulé avec contrainte de positionnement et d'orientation. La courbe rouge représente la référence (minimum jerk) tandis que la courbe noire montre l'évolution de la translation/rotation de la main au cours du temps. Afin de simplifier la comparaison de l'ensemble des profils temporels, les axes ont été normés.	171
5.42	Simulation de 3 séquences successives pour une contrainte de position de la main.	173
5.43	Trajectoire spatiale de la main en translation pour 5 séquences de mouvements effectuées avec le schéma de contrôle.	174
5.44	Placement des points pour le mouvement en étoile.	175
5.45	Exemple de 2 trajectoires réalisées par le premier sujet.	175
5.46	Simulation du premier mouvement de la séquence en étoile.	176
5.47	Simulation du second mouvement de la séquence en étoile.	176
5.48	Simulation du troisième mouvement de la séquence en étoile.	176
5.49	Simulation du quatrième mouvement de la séquence en étoile.	176
5.50	Simulation du cinquième mouvement de la séquence en étoile.	177

5.51	Simulation du sixième mouvement de la séquence en étoile.	177
5.52	Simulation du septième mouvement de la séquence en étoile.	177
5.53	Simulation du huitième mouvement de la séquence en étoile.	177
5.54	Simulation du neuvième mouvement de la séquence en étoile.	178
5.55	Simulation du dixième mouvement de la séquence en étoile.	178
5.56	Trajectoire simulée de la main en translation.	178
5.57	Comparaison de la mesure de déformation dans \mathbb{R}^3 entre l'acquisition (en vert) et la simulation (en orange).	180

DOCUMENT ANNEXE

5

C.1	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 1 pour le mouvement 1.	18
C.2	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 2 pour le mouvement 1.	19
C.3	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 3 pour le mouvement 1.	20
C.4	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 4 pour le mouvement 1.	21
C.5	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 5 pour le mouvement 1.	22
C.6	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 1 pour le mouvement 2.	23
C.7	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 2 pour le mouvement 2.	24
C.8	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 3 pour le mouvement 2.	25
C.9	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 4 pour le mouvement 2.	26
C.10	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 5 pour le mouvement 2.	27
C.11	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 1 pour le mouvement 3.	28
C.12	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 2 pour le mouvement 3.	29
C.13	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 3 pour le mouvement 3.	30
C.14	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 4 pour le mouvement 3.	31
C.15	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 5 pour le mouvement 3.	32
C.16	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 1 pour le mouvement 4.	33
C.17	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 2 pour le mouvement 4.	34
C.18	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 3 pour le mouvement 4.	35
C.19	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 4 pour le mouvement 4.	36
C.20	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 5 pour le mouvement 4.	37
C.21	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 1 pour le mouvement 5.	38
C.22	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 2 pour le mouvement 5.	39
C.23	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 3 pour le mouvement 5.	40
C.24	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 4 pour le mouvement 5.	41
C.25	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 5 pour le mouvement 5.	42
C.26	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 1 pour le mouvement 6.	43
C.27	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 2 pour le mouvement 6.	44
C.28	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 3 pour le mouvement 6.	45
C.29	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 4 pour le mouvement 6.	46
C.30	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 5 pour le mouvement 6.	47
C.31	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 1 pour le mouvement 7.	48
C.32	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 2 pour le mouvement 7.	49
C.33	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 3 pour le mouvement 7.	50
C.34	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 4 pour le mouvement 7.	51
C.35	Trajectoire spatiale de la main en rotation du sujet 5 pour le mouvement 7.	52
D.1	Evolution des valeurs singulières de la matrice jacobienne globale (position de la main et placement du regard) via un modèle cinématique classique.	78

D.2	Evolution des valeurs singulières de la matrice jacobienne en position via le système de priorisation.	79
D.3	Evolution des valeurs singulières dans le cas d'un modèle cinématique.	80
D.4	Ensemble des patterns relatifs aux valeurs singulières de la matrice jacobienne en position pour des mouvements avec contrainte de positionnement et d'orientation de la main.	81
D.5	Ensemble des patterns relatifs aux valeurs singulières de la matrice jacobienne en rotation pour des mouvements avec contrainte de positionnement et d'orientation de la main.	82
D.6	Trajectoire de la main pour différents sujets.	83

Liste des tableaux

2.1	Sous-phase d'assemblage du filtre à air.	54
2.2	Valeur massique de chaque corps.	62
2.3	Inertie autour des axes x , y et z de chacun des corps ($\times 10^3$ g.cm ²).	63
2.4	Amplitude articulaire maximale pour la colonne vertébrale.	65
2.5	Limites angulaires du cou.	66
2.6	Limites articulaires de l'articulation scapulo-humérale.	67
2.7	Limites articulaires de la liaison rotule de l'épaule.	67
2.8	Amplitude articulaire maximum du coude.	68
2.9	Limites angulaires associées au poignet.	68
3.1	Coordonnées des points sur la table (origine point E).	91
3.2	Moyenne et écart-type des mesures de déformation des trajectoires par sujet et tous sujets et essais confondus. Cas du mouvement sans contrainte d'orientation.	92
3.3	Moyennes et écart-type des mesures de la durée de chaque mouvement par sujet et tous sujets et essais confondus. Cas du mouvement sans contrainte d'orientation.	94
3.4	Calculs des durées de chaque mouvement par la méthode du MTM. Cas du mouvement sans contrainte d'orientation.	94
3.5	Coordonnées des points et orientation des segments sur la table (l'origine étant le point E). Cas du mouvement avec contraintes couplées.	97
3.6	Moyennes et écart-type des mesures de déformation des trajectoires par sujet et tous sujets et essais confondus. Cas du mouvement avec contraintes couplées.	99
3.7	Moyenne et écart-type de l'écart maximal à la géodésique dans $SO(3)$, pour chaque sujet. Cas du mouvement avec contraintes couplées.	100
3.8	Moyenne et écart-type de l'écart moyen à la géodésique dans $SO(3)$, pour chaque sujet. Cas du mouvement avec contraintes couplées.	100
3.9	Moyennes et écart-type des mesures de déformation en rotation des trajectoires par sujet et tous sujets et essais confondus.	104
3.10	Moyennes et écart-type des mesures de la durée de chaque mouvement par sujet et tous sujets et essais confondus.	104
4.1	Comparaison entre des mouvements avec et sans pondération de l'action des liaisons.	116
4.2	Algorithme de calcul d'une pile de l tâches.	122
4.3	Algorithme de calcul d'une pile de l tâches pondérées et filtrées.	123
4.4	Algorithme permettant le calcul et l'intégration de la contrainte d'évitement des butées articulaires.	129
5.1	Mesure de déformation (LI) du mouvement 3 pour différents réglages de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$	154

5.2	Mesure de déformation (<i>LI</i>) du mouvement 6 pour différents réglages de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$.	154
5.3	Comparaison entre les mesures de déformations des trajectoires capturées avec les trajectoires simulées.	156
5.4	Influence de la taille du mannequin sur les trajectoires spatiales simulées de la main.	157
5.5	Déformation de la trajectoire de la main en translation.	160
5.6	Mesure de déformation <i>DI</i> du mouvement 3 pour différents réglages de α_{rotation} et $\lambda_{\text{rotation}}$ avec un offset de 0,8.	163
5.7	Mesure de déformation <i>DI</i> du mouvement 6 pour différents réglages de α_{rotation} et $\lambda_{\text{rotation}}$ avec un offset de 0,8.	164
5.8	Comparaison de déformations de trajectoires dans les différents espaces pour la capture et la simulation.	164
5.9	Comparaison des mesure de déformation entre les données acquises (en vert) et la simulation (en orange).	165
5.10	Comparaison de l'écart (en degré) des trajectoires en rotation de la main entre la capture et la simulation (écart moyen et maximal par rapport à la géodésique).	166
5.11	Comparaison de l'éloignement à la géodésique entre les données acquises (en vert) et la simulation (en orange).	166
5.12	Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le premier mouvement.	166
5.13	Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le second mouvement.	167
5.14	Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le troisième mouvement.	167
5.15	Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le quatrième mouvement.	168
5.16	Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le cinquième mouvement.	168
5.17	Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le sixième mouvement.	169
5.18	Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le septième mouvement.	169
5.19	Mesure de déformation <i>LI</i> des mouvements 3 et 6 pour un cycle de 3 séquences successives.	173
5.20	Evolution de la déformation de trajectoire pour le mouvement 3.	174
5.21	Coordonnée de chaque point composant le dispositif expérimental.	174
5.22	Mesure de déformation <i>LI</i> de trajectoire pour le mouvement en étoile.	179
5.23	Mesure de déformation de la trajectoire de la main pour chaque mouvement composant la séquence en étoile pour la simulation.	179

DOCUMENT ANNEXE

5

A.1	Paramétrage du bras gauche.	6
A.2	Paramétrage du bras droit.	6
A.3	Paramétrage de la tête.	7
A.4	Paramétrage de la jambe gauche.	7
A.5	Paramétrage de la jambe droite.	7
B.1	Trajectoires spatiales planes de la main, mouvement contraint en translation. L'ordre d'affichage est de gauche à droite et de haut en bas, sujet par sujet et pour chaque sujet essai pas essai.	12

B.2	Mesure de déformation des trajectoires de la main, mouvements contraints en translation. .	13
B.3	Mesure des durées de chaque mouvement de la main.	14
C.1	Trajectoires spatiales planes de la main, mouvement avec contraintes couplées. L'ordre d'affichage est de gauche à droite et de haut en bas, sujet par sujet et pour chaque sujet essai par essai	16
C.2	Mesure de déformation des trajectoires de la main, mouvements contraints en translation et rotation.	17
C.3	Mesure de déformation des trajectoires de la main en rotation.	53
C.4	Mesure de l'éloignement maximal à la géodésique dans $SO(3)$ (mesure en degré).	54
C.5	Mesure de l'éloignement moyen à la géodésique dans $SO(3)$ (mesure en degré).	55
C.6	Profil temporel dans \mathbb{R}^3 pour le mouvement 1.	56
C.7	Profil temporel dans \mathbb{R}^3 pour le mouvement 2.	57
C.8	Profil temporel dans \mathbb{R}^3 pour le mouvement 3.	58
C.9	Profil temporel dans \mathbb{R}^3 pour le mouvement 4.	59
C.10	Profil temporel dans \mathbb{R}^3 pour le mouvement 5.	60
C.11	Profil temporel dans \mathbb{R}^3 pour le mouvement 6.	61
C.12	Profil temporel dans \mathbb{R}^3 pour le mouvement 7.	62
C.13	Profil temporel dans $SO(3)$ pour le mouvement 1.	63
C.14	Profil temporel dans $SO(3)$ pour le mouvement 2.	64
C.15	Profil temporel dans $SO(3)$ pour le mouvement 3.	65
C.16	Profil temporel dans $SO(3)$ pour le mouvement 4.	66
C.17	Profil temporel dans $SO(3)$ pour le mouvement 5.	67
C.18	Profil temporel dans $SO(3)$ pour le mouvement 6.	68
C.19	Profil temporel dans $SO(3)$ pour le mouvement 7.	69
C.20	Mesure des durées de chaque mouvement de la main.	70
C.21	Synchronisation temporelle entre la translation de la main (rouge) et l'orientation de la main (vert) pour le mouvement 2.	71
C.22	Synchronisation temporelle entre la translation de la main (rouge) et l'orientation de la main (vert) pour le mouvement 3.	72
C.23	Synchronisation temporelle entre la translation de la main (rouge) et l'orientation de la main (vert) pour le mouvement 5.	73
C.24	Synchronisation temporelle entre la translation de la main (rouge) et l'orientation de la main (vert) pour le mouvement 6.	74
C.25	Synchronisation temporelle entre la translation de la main (rouge) et l'orientation de la main (vert) pour le mouvement 7.	75
D.1	Déformation de trajectoire pour deux sujets. Le sujet 1 mesure 1,68m, le sujet 2 mesure 1,84m.	84

Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait jamais pu être accompli sans le soutien de bon nombre de personnes que je souhaite remercier à travers cette page.

Pour commencer, je tiens à remercier mes encadrants, Jean-Yves Fourquet et Pascale Chiron pour leur patience, leurs conseils et leur soutien. L'analyse du geste humain est difficile mais les grandes discussions que nous avons eu m'ont permis de progresser et de changer ma façon de voir les choses. Je suis sorti grandi de cette expérience et c'est en très grande partie grâce à vous deux.

Je remercie également les membres du jury de thèse, Bernard Bayle et Emmanuel Guigon pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit, Philippe Souères et Vincent Padois pour avoir assisté à la soutenance en tant qu'examineurs.

Je remercie également Marina Fazzini et Valentin Hue; Marina pour m'avoir été d'un grand soutien moral dans les premières années de thèse et Valentin parce que mes travaux sont la suite des siens mais surtout parce que ses conseils avisés m'ont permis de m'approprier rapidement son travail.

Je remercie bien sûr mon collègue de bureau, Hassen Medjahed pour sa très bonne humeur et son ouverture d'esprit.

De manière plus générale, je remercie tout le laboratoire et le personnel de l'ENIT pour m'avoir très bien accueilli et fait passer des années inoubliables. Je ne vais pas faire une énumération exhaustive des noms et prénoms de chacun, sachez simplement que je vous remercie du fond du coeur.

Je n'oublie pas non plus ma famille et mes amis, sans qui je n'aurais pas été celui que je suis actuellement. Merci pour votre patience et votre soutien sans faille après toutes ces années d'études. Je pense également aux personnes qui sont malheureusement parties trop tôt et qui m'ont toujours encouragé à leur façon, en particulier Elodie.

Merci.

Introduction

Les mannequins numériques et autres *avatars* sont de plus en plus présents dans un nombre croissant d'applications, du cinéma d'animation à l'ergonomie. Selon les applications, la représentation numérique de l'humain peut différer et la façon de générer les mouvements de celui-ci peut faire appel à différentes techniques. Pour une scène de film d'animation, les techniques actuelles requièrent de pouvoir re-jouer sur un avatar une séquence de mouvements mesurés sur un sujet réel. A contrario, lorsque l'objectif consiste à prédire le mouvement d'un opérateur sur un poste de travail qui reste à définir, il devient intéressant de disposer de moyens de prédiction des mouvements puisqu'il n'est pas possible de re-jouer. Cette thèse explore cette seconde situation et concerne la génération automatique de mouvements réalistes pour des modèles numériques d'humains. Plus précisément, l'étude est menée dans un cadre très proche de celui d'un poste de travail et on s'intéresse au mouvement de la partie supérieure du corps.

Dans ce type d'application, la préoccupation première est l'étude des troubles musculo-squelettiques (TMS) [ANACT 07] qui constituent la première cause de maladies professionnelles en France et dont le nombre de cas déclarés ne cesse de croître (figure 1 [www.travailler.mieux.gouv 12]).

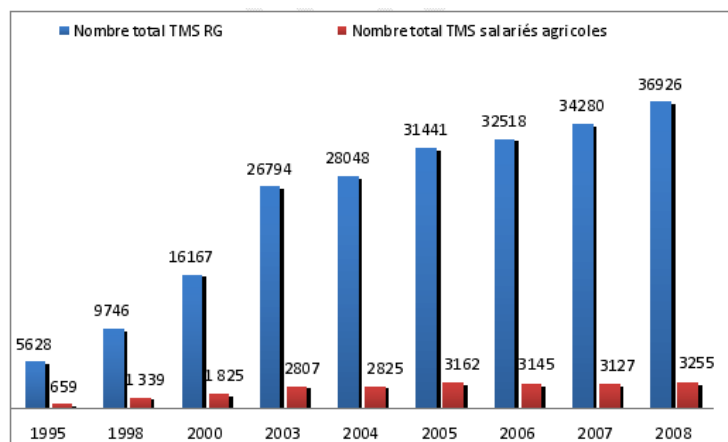


FIGURE 1 – Evolution du nombre de cas de TMS indemnisés pour le régime général et le régime agricole.

L'apparition des troubles musculo-squelettiques est traditionnellement liée à différents facteurs psychologiques, organisationnels et biomécaniques. Parmi les facteurs biomécaniques, on relève notamment : la répétition des tâches, les postures inadéquates et les charges transportées. La prédiction de mouvements réalistes sur mannequins numériques permettrait donc de détecter l'occurrence de postures inadéquates et par conséquent de fournir un outil d'amélioration des postes de travail.

Les tâches que doivent réaliser les opérateurs sont traditionnellement décrites sous la forme de séquences d'actions à réaliser : atteindre, saisir avec la main droite, regarder l'écran, ... Il y a donc un réel besoin pour une approche qui permettrait, à partir de ces seules données, de générer un mouvement humain réaliste.

Force est de constater qu'un tel outil n'existe pas véritablement aujourd'hui et les solutions commerciales ne permettent pas de résoudre efficacement cette question.

Cette thèse explore donc cette problématique. Nous utilisons pour cela des outils issus de la robotique classique que nous adaptons aux humanoïdes de synthèse. Les mouvements des robots sont traditionnellement décrits dans 2 espaces :

- l'espace utilisateur - ou espace de la tâche - dans lequel est représentée l'évolution des corps qui intéressent directement l'exécution de la tâche : les organes terminaux que nous représentons par la tête pour le regard, la main pour la manipulation, ...
- l'espace de commande - ou espace généralisé - dans lequel est représentée l'évolution de tous les paramètres des liaisons de la chaîne cinématique de l'humanoïde.

Ces espaces sont de dimensions différentes et l'application entrée-sortie qui les lie n'est donc en général pas univoque. L'enjeu de la génération automatique de mouvements consiste à choisir parmi une infinité de solutions dans l'espace de commande, une solution pour réaliser au mieux la tâche comme le montre la figure 2.

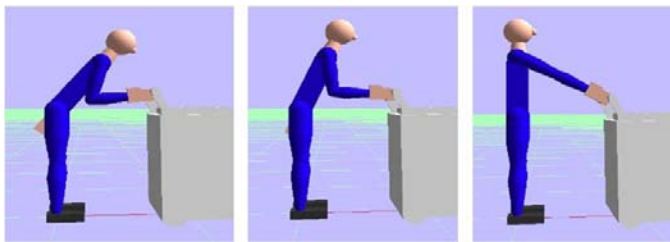


FIGURE 2 – Illustration de la redondance de l'être humain : pour une même position de l'extrémité de la main droite, plusieurs postures sont possibles.

Ce choix détermine à la fois le caractère spatial de l'évolution et son caractère temporel. Nous avons étudié dans ce cadre les stratégies issues des principes de minimisation de critères présents dans la littérature consacrée au mouvement humain. En effet, différents travaux tendent à démontrer que les mouvements humains sont le résultat d'optimisation et de priorisation dans l'espace de la tâche ou l'espace de commande. Ces résultats présentés dans la littérature amènent principalement plusieurs commentaires :

- la composante d'orientation de la trajectoire suivie par la main est mal connue,
- peu de travaux se sont intéressés à la synchronisation de l'orientation et de la position dans l'espace de la tâche,
- la variabilité des résultats obtenus indique que ces critères ne peuvent être qu'un des mécanismes mis en jeu.

Notre approche étudie le lien entre les trajectoires qui minimisent le déplacement dans l'espace de la tâche, celles qui résultent d'une pondération sur l'action des différentes liaisons dans les schémas d'inversion généralisée des modèles cinématiques, et les trajectoires obtenues expérimentalement. Nous nous intéressons également sur le plan temporel aux trajectoires de référence dans la littérature que sont les trajectoires résultant de la minimisation du jerk. Cette étude s'appuie sur des expérimentations de capture de mouvement destinées à nous renseigner sur :

- la trajectoire de la main lorsque celle-ci est soumise à des contraintes de positionnement seule, et à des contraintes couplées en position et orientation,
- le profil temporel de celle-ci dans les différents sous-espaces de la tâche,
- la synchronisation spatiale et temporelle des trajectoires en position et en orientation dans l'espace de la tâche.

Sur cette base, l'objectif est de mettre en œuvre un schéma de génération de mouvement basé sur la prise en compte d'un coût à la fois dans l'espace de la tâche et dans l'espace des liaisons. Cette étude

requiert donc la caractérisation de l'application liant les deux espaces et nécessite un traitement adapté, différencié et éventuellement priorisé pour les paramètres de translation et de rotation définissant la tâche.

Finalement, ce schéma de génération de mouvements doit permettre la rotation de la tête pour orienter le regard, la translation de la main et sa rotation pour réaliser des gestes d'atteinte, l'évitement des butées articulaires, de l'auto-collision des corps du mannequin et éventuellement l'ajustement vers une posture de référence ou de confort.

Ce manuscrit est organisé de la façon suivante :

- *Introduction*
- *Chapitre 1 - Problématique* : nous présentons dans ce premier chapitre les éléments essentiels qui vont servir de base à notre étude. Nous faisons un état de l'art rapide de l'anatomie humaine et recensons les modélisations existantes. Nous étudions également de manière générale les mouvements de l'humain. Enfin, nous étudions les différentes façons d'évaluer l'ergonomie d'un poste de travail.
- *Chapitre 2 - Modélisation* : nous présentons une modélisation via les systèmes robotiques de notre humanoïde. Nous établissons également la description d'une tâche et d'une séquence de tâches dans l'espace de la tâche. Enfin, nous caractérisons le mouvement d'un corps par une trajectoire spatiale et un profil temporel. Nous décrivons l'ensemble des outils utilisés dans ce manuscrit pour caractériser les mouvements.
- *Chapitre 3 - Expérimentations* : nous présentons un état de l'art du geste humain pour des tâches d'atteinte. Nous proposons également une série d'expérimentations menées au sein du laboratoire sur divers sujets qui nous permettent de caractériser les mouvements effectués des points de vue spatial et temporel.
- *Chapitre 4 - Schéma de génération de mouvement* : Dans ce chapitre, nous mettons en place le schéma de génération automatique de mouvement réaliste. Nous décrivons l'ensemble des algorithmes et calculs qui composent le schéma de simulation.
- *Chapitre 5 - Validation du modèle* : ce dernier chapitre présente le logiciel utilisé pour l'implémentation de ces algorithmes : OLARGE-TMS. Il décrit également le fonctionnement d'une méthode de re-jeu basée sur notre schéma afin de caractériser les déplacements de la chaîne articulée de l'humanoïde. Nous présentons par la suite la façon dont nous procédons pour paramétrer notre schéma de simulation. Enfin, nous réalisons des expériences supplémentaires afin de comparer acquisition et simulation dans de nouveaux scénarii.
- *Conclusion*

Les travaux présentés dans ce mémoire ont fait l'objet de publications [Datas 10, Datas 11, Datas 12a, Datas 12b, Fillatreau 13].

Chapitre 1

Problématique

Afin de créer un schéma de génération automatique de mouvements réalistes, nous sommes amenés dans un premier temps à analyser les différents éléments qui vont entrer dans la composition de notre schéma. La première partie de ce chapitre se consacre à l'étude de l'appareil locomoteur. Nous attachons davantage d'importance à l'appareil locomoteur du haut du corps. En effet, ce manuscrit se limite à des mouvements répétitifs en position assise. Nous étudions par la suite les mouvements du squelette en détaillant les éléments complexes comme l'épaule, la colonne vertébrale et l'avant-bras.

Nous analysons ensuite les différentes modélisations existantes de l'humain sous forme robotique. Les représentations étudiées permettent d'utiliser les outils de la robotique pour animer un mannequin numérique.

La troisième partie se consacre à l'étude des techniques d'animations permettant de déplacer les robots et les mannequins. Ces techniques peuvent s'adapter pour générer des mouvements réalistes, ce que nous étudions également dans cette partie sous la forme d'une discussion.

Le quatrième volet permet d'aborder la notion d'évaluation ergonomique d'un poste de travail. Nous détaillons les facteurs liés au risque d'apparition de troubles musculosquelettiques et la façon de les mesurer. Nous étudions également l'apport des mannequins numériques dans ce domaine.

Enfin, nous concluons sur les différents éléments détaillés dans ce chapitre.

1.1 Description, analyse et visualisation des mouvements humains

Nous nous intéressons à la simulation du mouvement humain sans préjuger de l'origine du contrôle moteur. Il est donc naturel de se tourner vers une description anatomique. De la même façon que dans les travaux de Chadwick *et al* [Chadwick 89], nous décomposons l'humain en trois parties qui sont :

- le squelette,
- les organes, les muscles,
- la peau.

Nous abordons dans cette étude les caractéristiques de l'humain en relation avec ses fonctions motrices, en focalisant notre démarche sur l'appareil locomoteur, l'enveloppe externe étant discutée dans le cadre de la visualisation des mouvements.

1.1.1 Le squelette humain : généralités

Le squelette humain appartient à l'appareil locomoteur passif. Il est composé essentiellement d'os, de cartilage et de ligaments. Les nombreux os (environ 206) qui composent l'homme ont des géométries différentes. Leur taille relative par rapport à la hauteur de l'homme est souvent proche d'un individu à l'autre, ce qui veut dire que les proportions entre les individus sont similaires. L'anthropométrie regroupe

l'ensemble des techniques de mensuration du corps humain. Les mesures s'effectuent généralement sur une population particulière que l'on souhaite mesurer (exemple : population adulte). Afin d'extraire des caractéristiques dimensionnelles, massiques et inertielles, il peut être nécessaire de décomposer le corps humain, comme le fait par exemple, Hanavan [Hanavan 64] en recourant à 15 parties. Nous pouvons citer le document de Robinson *et al* [Robinson 88] qui comporte l'utilisation d'une des plus grandes bases de données anthropométriques au monde regroupant des mesures issues de diverses populations telles que le personnel militaire des forces américaines.

Les os qui constituent le squelette humain peuvent être classés en trois catégories : les os plats (homo-pla, sternum), les os courts (vertèbres, tarses et carpes) et les os longs (humérus, radius, tibia, etc...). Les interactions entre les os sont de deux natures différentes. D'une part, nous avons des os qui sont simplement soudés entre eux et qui ne permettent aucun mouvement (ou alors très faible, telles que les articulations synarthroses destinées à la croissance de l'individu). De l'autre, nous avons des os mobiles grâce aux articulations synoviales. Parmi ces derniers, nous dénombrons six mouvements relatifs différents qui sont observables sur la figure 1.1.

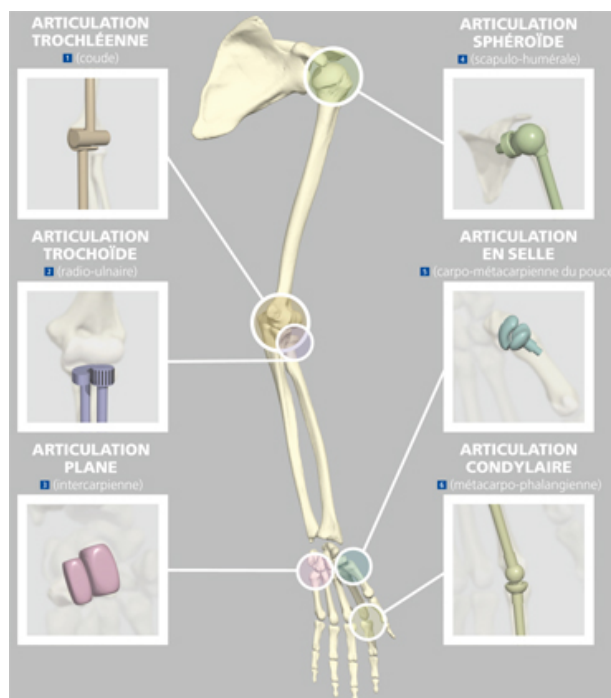


FIGURE 1.1 – Les 6 différentes articulations synoviales [Online 12]

- Articulation trochléenne : dans cette articulation, la surface convexe d'un os s'ajuste dans la surface concave d'un autre os, ce qui permet des mouvements d'ouverture et de fermeture sur un seul axe (l'articulation du coude ou du genou).
- Articulation trochoïde : la surface arrondie d'un os s'adapte à un anneau formé par un autre os et un ligament pour assurer des mouvements de rotation autour d'un axe longitudinal uniquement. C'est le cas, par exemple, de l'articulation radio-ulnaire.
- Articulation plane : les surfaces sont planes et permettent des mouvements de glissement. C'est le cas de l'articulation sterno-claviculaire.
- Articulation sphéroïde : les deux surfaces sont sphériques, l'une est convexe et l'autre, plus profonde, concave, ce qui permet un mouvement autour de trois axes et dans tous les plans (exemple :

articulation scapulo-humérale)

- Articulation en selle : la surface en forme de selle d'un os est chevauchée par la surface articulaire de l'autre (exemple : l'articulation carpo-métacarpienne du pouce).
- Articulation condyloïde : la surface convexe et ovale d'un os s'adapte à la cavité concave, également ovale, d'un autre os ce qui permet le mouvement sur deux axes. C'est le cas des os du poignet.

1.1.2 Constituants d'une articulation

Une articulation synoviale est obligatoirement couplée à des ligaments et du cartilage pour fonctionner correctement. Aussi, le schéma 1.2 résume de façon concrète la place que tient chacune de ces entités. Il montre le système ligamenteux permettant le maintien en position d'une articulation. S'ajoutent à ces derniers les tendons, fixés sur chacun des deux os. Les muscles sont attachés de part et d'autre aux tendons.

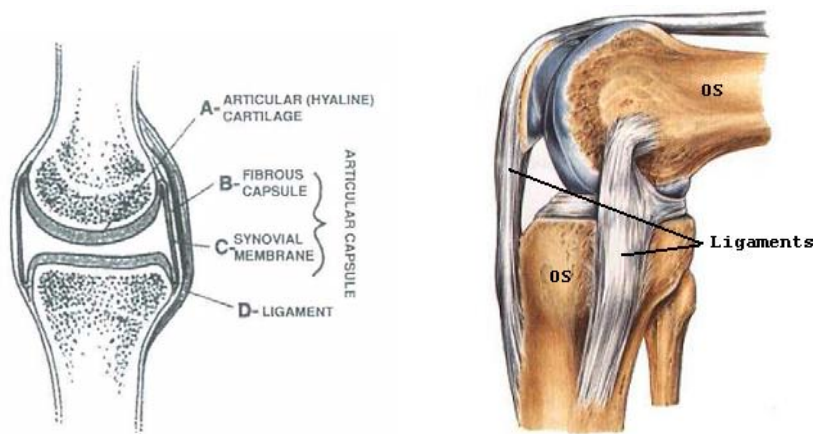


FIGURE 1.2 – Composition d'une articulation [Zatsiorsky 98].

Les muscles font partie de la grande famille des tissus musculaires comprenant deux grandes catégories : les muscles lisses et les muscles striés. Les muscles lisses sont uniquement employés par les organes comme l'estomac ou l'intestin et n'entrent pas dans le système locomoteur. Leurs contractions sont involontaires et contrôlées par le système nerveux végétatif. Les muscles striés, également appelés muscles squelettiques, composés de fibres longues, dépendent d'une impulsion nerveuse volontaire. Ils permettent une contraction bien plus rapide que leurs homologues lisses et contribuent tous au mouvement.

Les tendons et les ligaments font partie du tissu conjonctif serré. Les tendons permettent de réaliser la liaison entre les muscles et les os. Étant donné qu'ils possèdent une forte concentration nerveuse, ils vont informer le cerveau de la contrainte musculaire. Les ligaments quant-à eux réalisent et maintiennent en place la liaison entre deux os. Ils servent dans certains cas à limiter le débattement articulaire. Ces deux systèmes sont des éléments passifs qui jouent néanmoins un rôle très important dans l'articulation.

Le cartilage fait partie du tissu conjonctif cartilagineux. Ce sont les cartilages hyalins et fibreux que nous retrouvons dans chaque articulation. Ils se situent à la surface de contact entre deux os afin de réduire les chocs et d'assurer un meilleur glissement relatif.

1.1.3 Ensemble des mouvements articulaires

L'appareil locomoteur humain tel que nous l'avons décrit précédemment est une entité constituée d'un ensemble d'articulations. Ces dernières peuvent avoir un ou plusieurs degrés de mobilité selon leur type. Nous présentons dans un premier temps les différents plans définis dans la littérature afin de caractériser les mouvements engendrés par l'action de chacune de ces articulations.

1.1.3.1 Les plans de référence

La communauté scientifique a adopté une représentation utilisant trois plans de référence, perpendiculaires entre eux afin d'unifier le langage lors d'études sur le corps humain. La posture adoptée pour la définition de ces plans correspond à celle d'une personne se tenant debout, les bras le long du corps et l'intérieur des mains tourné vers le corps. Ces plans de référence sont définis sur la figure 1.3.

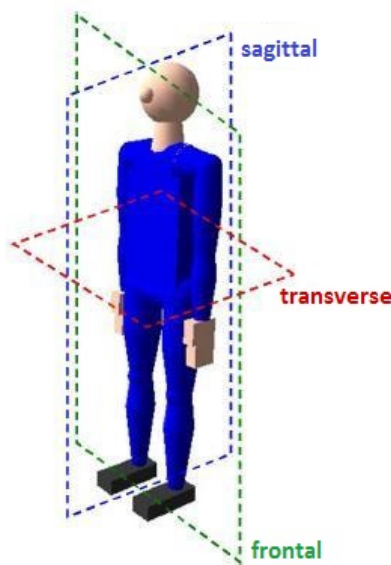


FIGURE 1.3 – Les plans de référence de l'humain.

Le plan frontal définit le plan face à la personne, le plan sagittal montre le profil de la personne et le plan transverse correspond à un plan de coupe horizontal.

1.1.3.2 Les mouvements produits

La communauté scientifique a défini le mouvement de chaque articulation. Ainsi, la figure 1.4 définit les mouvements du haut du corps induits par un déplacement de la colonne vertébrale. Nous observons trois mouvements distincts. Le mouvement de flexion/extension est porté par le plan sagittal, le mouvement d'inflexion est porté par le plan frontal et le mouvement de rotation interne/externe est porté par le plan latéral.

Les mouvements de l'épaule sont au nombre de 5. L'épaule étant un élément complexe, nous étudions plus loin son principe de fonctionnement. Ces mouvements sont schématisés par les figures 1.5 et 1.6.

Le mouvement du coude se réalise par une simple flexion/extension de celui-ci comme présenté sur le schéma 1.7.

L'articulation du poignet est découpée en trois mouvements suivant le schéma 1.8.

Nous nous intéressons également au cou, plus exactement aux mouvements dus aux vertèbres cervicales. Nous illustrons ces mouvements sur la figure 1.9.

1.1.3.3 Les articulations complexes

Il arrive que plusieurs de ces articulations se combinent autour d'un même os. Les mouvements cinématiques que ces liaisons produisent deviennent alors extrêmement complexes. En effet, ces articulations

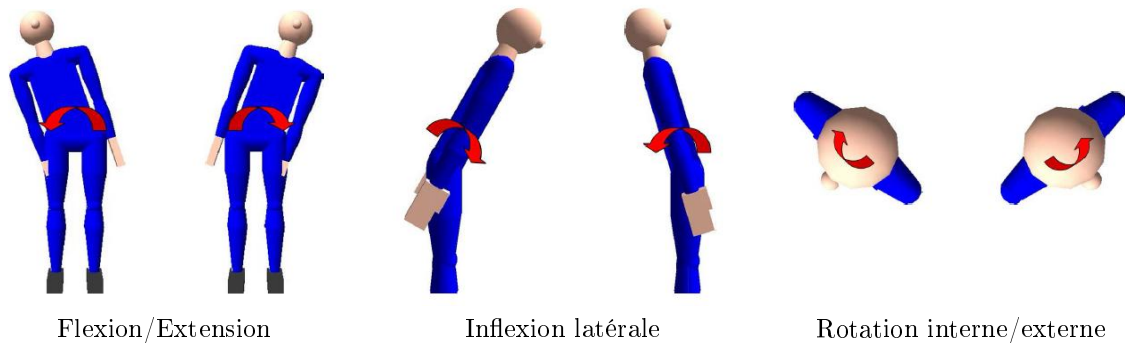


FIGURE 1.4 – Ensemble des mouvements relatifs à la colonne vertébrale.

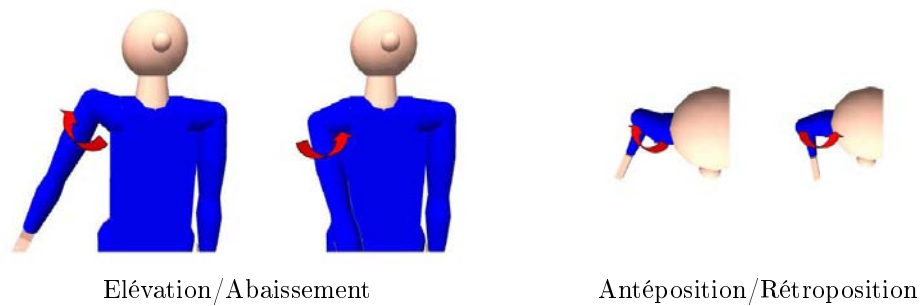


FIGURE 1.5 – Ensemble des mouvements relatifs de l'articulation sterno-costoclaviculaire et de l'articulation acromio-claviculaire de l'épaule.

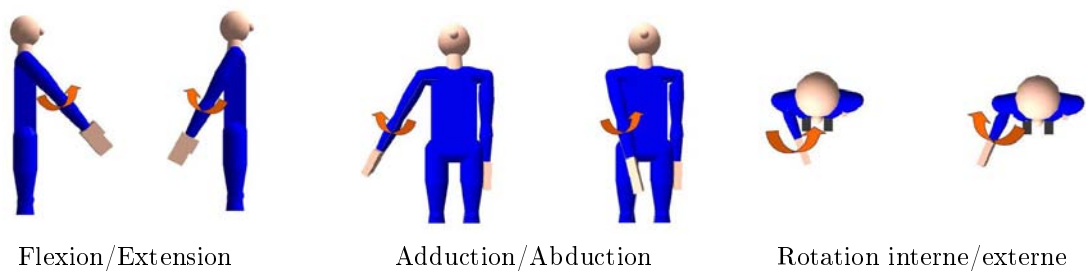


FIGURE 1.6 – Ensemble des mouvements relatifs à l'articulation humérale de l'épaule.

sont composées d'os qui ont des formes particulières (par exemple l'omoplate) et engendrent des déplacements particuliers. Nous détaillons de ce fait la colonne vertébrale, l'épaule ainsi que le mouvement de pronosupination de l'avant-bras.

La colonne vertébrale joue plusieurs rôles essentiels comme le soutien et la mobilité du haut du corps et la protection de la moelle épinière. Elle est composée de vertèbres qui s'apparentent à des disques et sont classées en 5 groupes selon leur position spatiale comme illustré sur la figure 1.10 issue de Zatsiorsky [Zatsiorsky 98].

- coccyx : composé de 4 vertèbres soudées entre elles, il protège les organes internes comme le tube digestif.

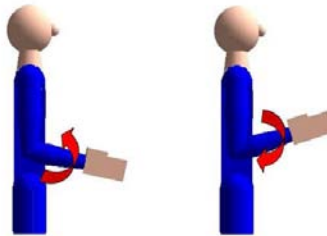


FIGURE 1.7 – Mouvement de flexion/extension du coude.

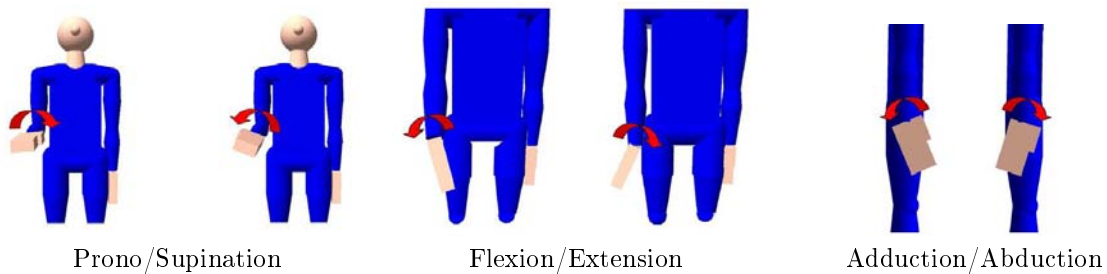


FIGURE 1.8 – Ensemble des mouvements du poignet.

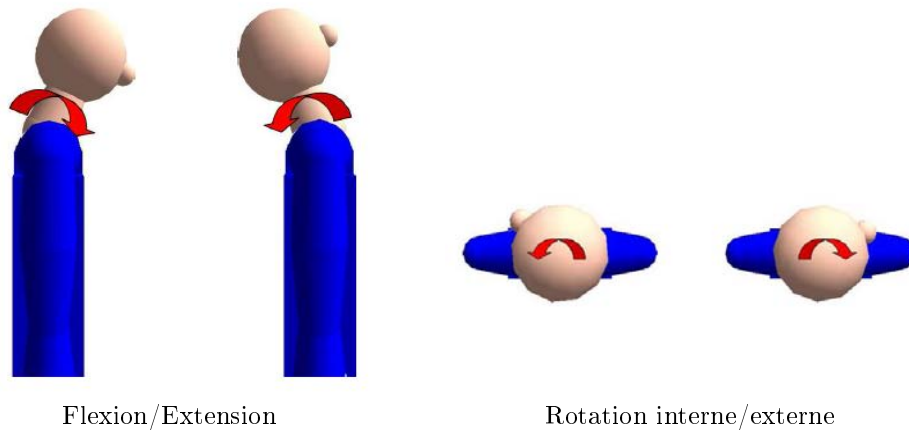


FIGURE 1.9 – Ensemble des mouvements relatifs au cou.

- sacrum : composé de 5 vertèbres soudées, il réalise un lien rigide entre le haut de la colonne et la ceinture pelvienne.
- vertèbres lombaires : 5 vertèbres mobiles.
- vertèbres dorsales : 12 vertèbres mobiles.
- vertèbres cervicales : 7 vertèbres dont *Atlas* située juste sous le crâne et qui soutient son poids. Cette vertèbre doit sa mobilité à l'*axis*, la vertèbre située juste en dessous d'elle.

Les vertèbres cervicales qui sont placées dans la partie supérieure de la colonne vont principalement orienter la tête afin de placer le regard en fonction de l'opération à effectuer. Les vertèbres dorsales permettent de positionner les épaules. Les vertèbres lombaires permettent de positionner correctement le haut de la colonne vertébrale avec le bassin. La partie basse de la colonne vertébrale sert à orienter le haut

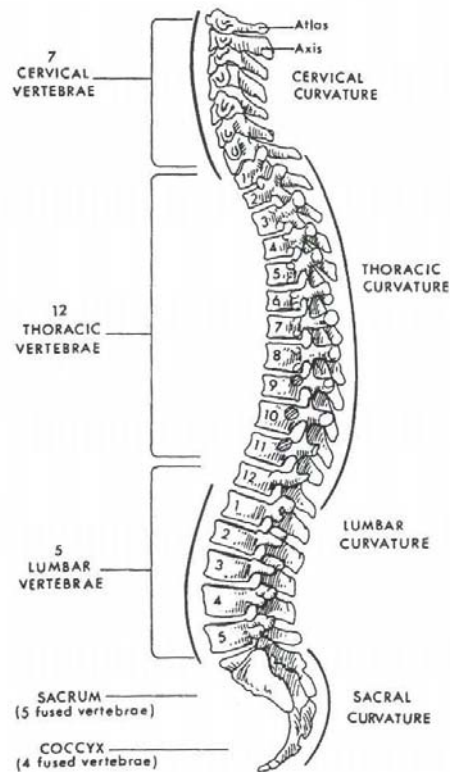


FIGURE 1.10 – Composition de la colonne vertébrale [Zatsiorsky 98].

du corps afin d'optimiser les mouvements des chaînes supérieures.

Le mouvement de l'épaule est également un cas particulier puisque les mouvements des os qui la composent ne sont pas de simples rotations autour d'un axe fixe. Le *complexe de l'épaule* est constitué de 5 articulations visibles sur la figure 1.11 qui sont :

- Articulation sterno-claviculaire,
- Articulation acromio-claviculaire,
- Articulation gléno-humérale,
- Articulation scapulo-serrato-thoracique,
- Articulation costo-sternale.

La ceinture scapulaire regroupe l'articulation sterno-claviculaire, l'articulation acromio-claviculaire et l'articulation scapulo-humérale. Cet ensemble d'articulations prédomine dans le mouvement de l'épaule. Ces articulations agissent sur les os de la ceinture scapulaire : la clavicule, l'omoplate et le sternum. Cet ensemble complexe donne à l'omoplate une mobilité qui se rapproche de celle des mouvements de translation dans le plan latéral [Hogfors 91].

Lindsay [Lindsay 01] simplifie les articulations de l'épaule afin de mettre en évidence les 3 articulations ayant de grandes amplitudes. Leur disposition est illustrée sur le schéma 1.12.

Les articulations sterno-claviculaire et acromio-claviculaire permettent des mouvements d'antéposition/rétroposition et d'élévation/abaissement de l'épaule (figure 1.5). L'articulation scapulo-humérale relie l'omoplate à la tête humérale et génère des mouvements de rotation, de la même façon qu'une liaison rotule et produit les mouvements décrits sur la figure 1.6.

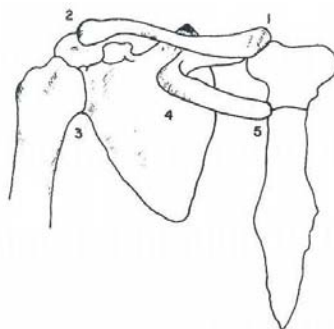


FIGURE 1.11 – Les différentes articulations de l'épaule. (1) articulation sterno-claviculaire, (2) articulation acromio-claviculaire, (3) articulation gléno-humérale, (4) articulation scapulo-serrato-thoracique, (5) articulation costo-sternale. Source : [Chaffin 06]

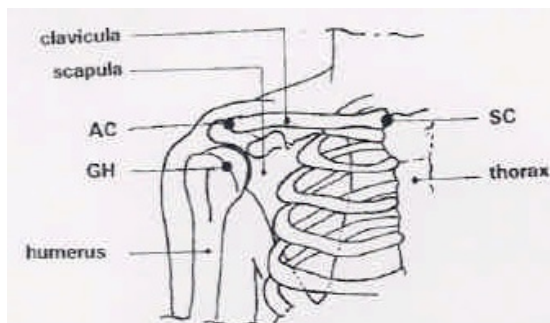


FIGURE 1.12 – Disposition des trois articulations principales de l'épaule selon l'étude de Lindsay [Lindsay 01]. AC, SC et GH sont les abréviations respectivement des liaisons Acromio-Claviculaire, Sterno-Claviculaire, Gléno-Humérale.

Le mouvement de prono-supination de l'avant bras (figure 1.8) est également un cas particulier. En effet, c'est le glissement combiné de deux os (cubitus et radius) et la configuration des muscles qui permet l'une des rotations du poignet (figure 1.13).

1.1.4 Le mouvement humain

L'homme a sans doute évolué au fil du temps pour s'adapter à son environnement en améliorant l'efficacité des gestes qu'il produit. En pratique, ces gestes sont d'une grande diversité et tenter de caractériser *le mouvement humain* semble une démarche vouée à l'échec.

Il y a *des* mouvements humains qui répondent certainement à divers principes générateurs. En effet, nous nous déplaçons dans le but de réaliser différents objectifs qui peuvent être de natures très variables : jouer au foot ou se laver par exemple. Certains de nos mouvements sont volontaires tandis que d'autres, réflexes ou spasmes, répondent à des stimuli involontaires. Nos gestes résultent de la contraction des muscles. Cependant, cette gestuelle dépend également de plusieurs facteurs qui peuvent être d'ordre physiologique (la taille, la musculature de la personne, l'âge, le sexe, le genre) [Summers 10, Chaffin 99] et également d'ordre psychologique comme l'attitude de la personne, sa personnalité, son état d'esprit [Trimmel 09]. L'environnement extérieur peut également agir sur la personne comme le montre l'étude de Peczoli et Szabo [Peczöli 99] qui corrèle les paramètres du lieu de travail à l'état d'esprit de la personne. Les mouvements sont également différents suivant les stratégies adoptées pour réaliser une tâche.

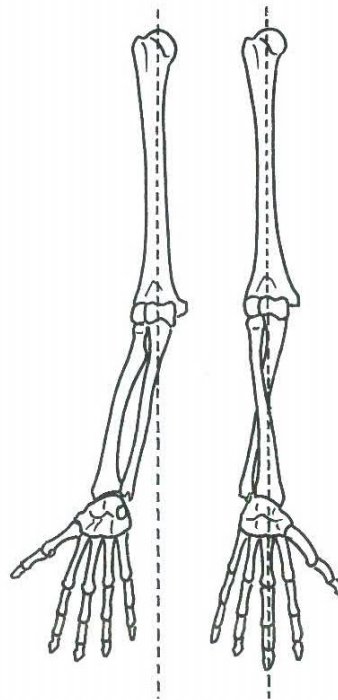


FIGURE 1.13 – Mouvement des deux os lors de la pronation issu de [Dufour 05].

Si l'on doit comparer deux mouvements humains, il faut alors se poser la question de savoir si l'on compare le résultat du mouvement (a-t-on correctement manipulé l'objet?) ou bien si l'on compare la mise en mouvement de toutes les mobilités de l'appareil locomoteur (les articulations se déplacent-elles de la même valeur?). En général, nous portons notre attention sur des fonctions telles que *regarder*, *marcher* ou *manipuler* et par conséquent sur les terminaisons de notre corps que sont les mains, les pieds et la tête. Prenons l'exemple d'une personne qui conduit. Celle-ci doit actionner ses mains pour tourner le volant, actionner ses pieds pour accélérer et tourner sa tête pour regarder l'environnement. Nous nous trouvons dans le cas d'un environnement très contraint dans lequel la gestuelle est très limitée. Pourtant, nous avons chacun une façon différente de conduire. Notre corps possède un nombre d'articulations très important qui nous permet de positionner nos mains avec une infinité de valeurs angulaires différentes pour les articulations. Dans cet exemple, la fonction à réaliser (*conduire*) ne définit pas de manière unique la position des mains et cela influe sur les différentes postures générées. Dans le cas de tâches qui définissent de manière unique la position des mains, on observe également des valeurs différentes pour les angles formés par les différentes articulations.

Nous pouvons également noter que, dans le cadre du sport ou du travail, les mouvements générés ne répondent pas seulement à la gestuelle humaine innée mais résultent d'un apprentissage ou du respect de règles de bonne pratique. Ces gestes techniques permettent, par exemple, de diminuer les contraintes internes au sein du corps humain afin de réduire les risques d'atteinte à la santé de la personne tels que les troubles musculo-squelettiques. La figure 1.14 illustre un exemple de lever/déposer d'objet lourd avec à gauche, le mouvement naturel, et à droite, le mouvement conseillé par les ergonomes.

Par ailleurs, la symétrie n'est pas nécessairement la règle : il existe toujours une main dominante (main droite à environ 80%). Cette préférence signifie que la dextérité et la force de la main préférée seront différentes de celles de l'autre, d'où une dissymétrie en terme de comportement. Les stratégies de déplacements de chaque main sont différentes selon que nous en utilisons une seule ou les deux, et selon

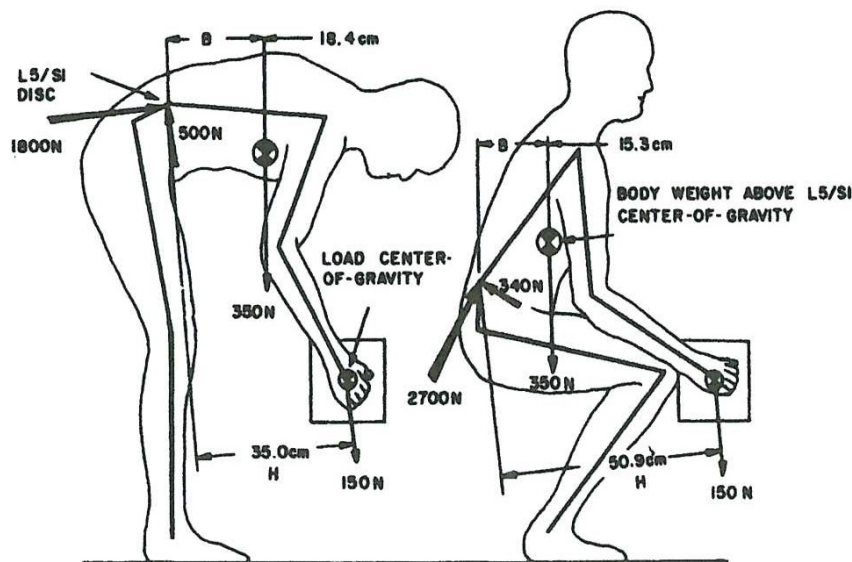


FIGURE 1.14 – Postures, non recommandée et recommandée, pour le soulevé de charge lourde [Park 74].

la complexité de la tâche à réaliser [Kelso 79, Bingham 08].

Enfin, le mouvement est caractérisé par ce que nous en mesurons. A ce titre, il est bon de rappeler que nous ne voyons que la manifestation externe des mouvements de l'appareil locomoteur. Cette visualisation des mouvements est donc en particulier tributaire des variations de l'enveloppe charnelle des différents sujets humains. Par ailleurs, notre perception du geste est déformée d'une part par les imperfections de l'oeil, et d'autre part à cause de nos expériences passées, qui nous entraînent dans des jugements très subjectifs. Par conséquent, nous sommes tous experts (mais à des niveaux différents) pour juger de la qualité, et estimer l'efficacité d'un mouvement. Et nous pouvons notamment dire qu'un mouvement n'est pas réalisé de manière habituelle ou naturelle. De la même manière, nous sommes à même de distinguer deux mouvements très peu différents.

Par contre, la quantification des différences et la définition d'un mouvement *réaliste* ne font pas partie de nos capacités. Il est donc important de se diriger vers des outils d'analyse plus objectifs, dont les mesures ne dépendent pas de la personne *mesurante* afin d'étayer ou de compléter les informations qualitatives issues de la visualisation de l'enveloppe extérieure.

1.2 Modélisation de l'humain

La simulation de l'humain dans un certain nombre de ses dimensions (psychologique, bio-mécanique, neuro-motrice, ...) se répand dans le cadre d'applications ludiques, culturelles, professionnelles ou liées à la santé. Dans nos travaux, nous nous limitons à la représentation du corps humain dans le but d'analyser et de reproduire des mouvements. Cette représentation peut-être rapprochée notamment de celles utilisées dans l'industrie du jeu vidéo et de l'animation ou des représentations utilisées dans l'analyse des postes de travail à des fins d'ergonomie ou de productivité.

Le marché grandissant du jeu vidéo impose aux développeurs de repousser les limites du réalisme, aussi bien au niveau du graphisme qu'en ce qui concerne la performance motrice des personnages. Il fait donc appel à une représentation détaillée de l'appareil locomoteur afin de rendre compte des différentes actions des personnages. Les outils employés dans ce cas s'appuient généralement sur des techniques d'animation qui utilisent des bibliothèques de mouvements pré-enregistrés qui sont ensuite mis en cohérence avec des

modèles d'appareil locomoteur.

La modélisation de l'humain est également mise en jeu dans le design de produits. Que ce soit pour la conception d'outils, de fauteuils ou d'habitacles automobile, des représentations de l'humain permettent de faire des choix dans une démarche marketing, ou dans un processus d'amélioration de l'ergonomie centrée sur l'objet.

Enfin, la représentation de l'humain est utilisée pour réaliser des analyses centrées sur l'homme comme l'étude de la gestuelle pour améliorer des performances physiques ou prévenir des risques liés aux troubles musculosquelettiques. Elle permet notamment de valider le séquençage d'une tâche pour un opérateur ou encore d'adapter l'environnement, par une meilleure disposition géographique des éléments. En entreprise, ces éléments peuvent être des outillages, des machines, ... et constituent le poste de travail. Une meilleure répartition des objets sur le poste de travail permet à l'opérateur de rester dans des postures confortables ou non traumatisantes pour accomplir sa tâche. A titre d'exemple, Baerlocher [Baerlocher 01] cherche un meilleur positionnement des ceintures de sécurité dans les voitures.

C'est cette dernière approche qui nous intéresse le plus dans le cadre de cette thèse où nous souhaitons simuler le mouvement humain dans des situations semblables à celles des postes de travail. Avant d'étudier plus en détail les notions d'analyse ergonomique, nous allons nous attacher à décrire les différentes modélisations existantes de l'humain et les diverses techniques d'animation pour la simulation de mouvements réalistes.

1.2.1 Les mannequins numériques

Les mannequins numériques permettent de modéliser la structure motrice de l'humain, de la visualiser et de l'animer dans un environnement graphique en 3 dimensions. Il y a une grande proximité entre la modélisation des mannequins numériques et la structure des robots humanoïdes. La simulation de robots humanoïdes et l'animation de mannequins numériques vont donc faire appel sensiblement aux mêmes modèles et techniques issus de la robotique. Dans de tels systèmes, les os sont traditionnellement représentés par des solides rigides indéformables et les articulations sont modélisées par des liaisons mécaniques idéales.

On distingue aujourd'hui :

- des modèles squelettiques qui font abstraction des muscles, tendons et ligaments et dans lesquels on suppose que l'articulation est directement pilotable,
- des modèles musculo-squelettiques dans lesquels les déplacements des articulations résultent du pilotage des différents muscles.

Les mouvements observés au niveau de l'enveloppe extérieure sont identiques mais le pilotage et la complexité de la description diffèrent. Dans tous les cas, les avatars peuvent être dotés de caractéristiques dimensionnelles et de propriétés inertielles sur la base de données anthropométriques. Enfin, nous devons habiller ce système robotique d'une peau artificielle afin de pouvoir observer le mouvement de l'enveloppe extérieure.

1.2.1.1 Modélisation avec liaisons pilotables

Dans ce genre de modélisation qui constitue l'approche classique en robotique, les liaisons mécaniques sont directement pilotées. Les segments rigides sont reliés entre eux par des liaisons pivots actives, supposées parfaites (sans frottement, rotation autour d'un axe fixe,...). Pour générer un mouvement sur l'humanoïde, nous agissons directement sur les liaisons du système. La modification de la position articulaire d'une liaison influe directement sur la situation des segments auxquels elle est rattachée. L'ensemble des valeurs angulaires des liaisons pivots qui articulent l'humanoïde peut alors être regroupé dans un vecteur qui définit de manière unique la *configuration* (où *posture*) et traduit l'évolution des différents corps de l'humanoïde les uns par rapport aux autres.

Il n'existe pas de modélisation unique de l'humain avec ce type d'actionneur. Ces modélisations sont fonction de ce que nous cherchons à visualiser, des corps que nous souhaitons représenter. Différents

modèles ont été utilisés : une illustration de ces modélisations est fournie par la figure 1.15.

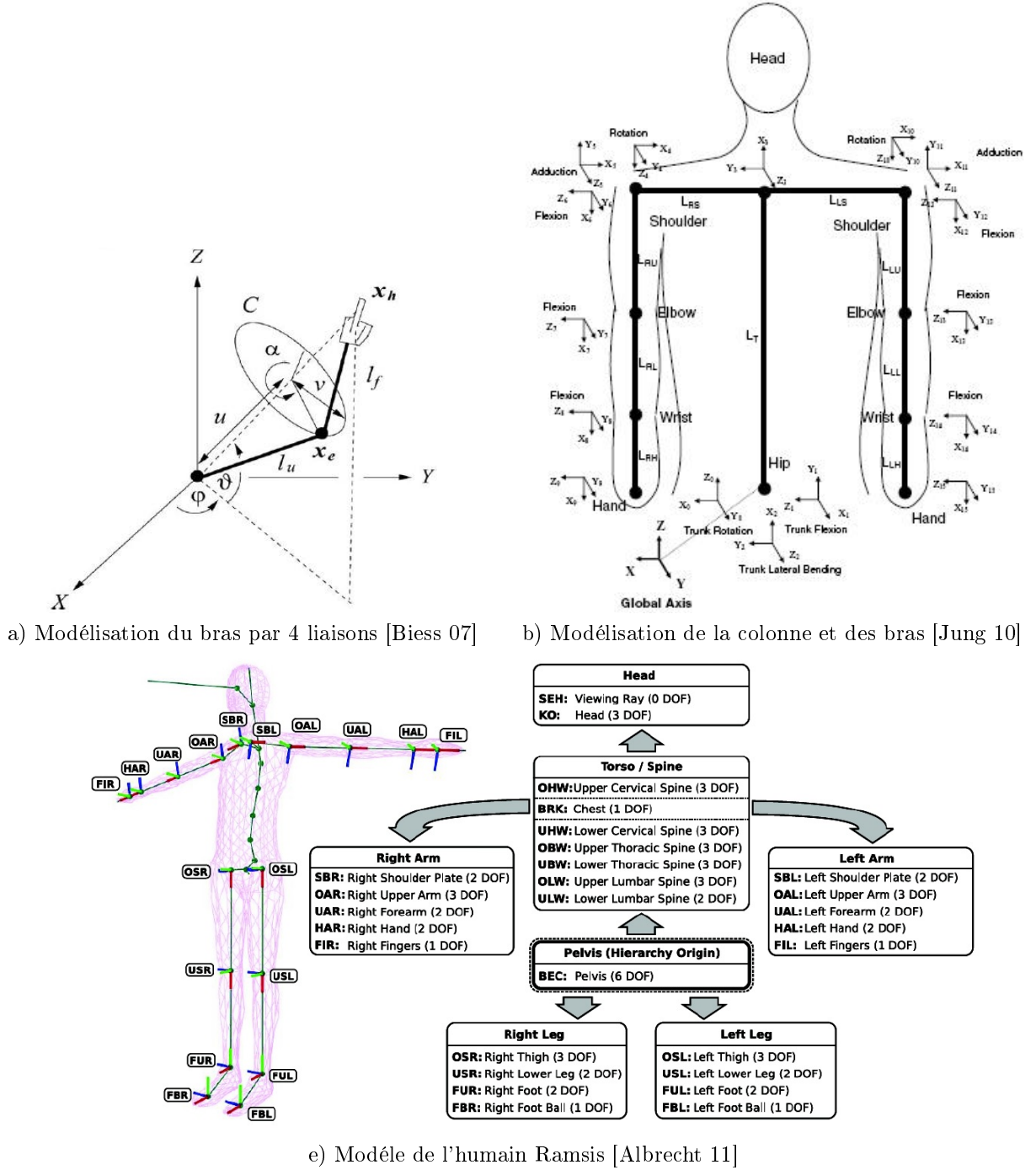


FIGURE 1.15 – Illustrations de quelques modélisations par système robotique utilisant des liaisons pivots actives.

La figure 1.15 a) montre la modélisation du bras humain à l'aide de 4 liaisons issue de [Biess 07]. La

figure 1.15 b) illustre une modélisation du haut du corps issue de [Jung 10]. Elle comprend une colonne vertébrale et deux bras. Enfin, la figure 1.15 e) illustre le mannequin RAMSIS et ses 63 liaisons. Notons que ces dernières sont organisées sous la forme d'une hiérarchie. D'autres modélisations du même type peuvent être observées dans le domaine de la capture optique de mouvement pour la médecine, par exemple.

Le nombre de liaisons qui nous sert à modéliser l'humain est donc fonction des différentes parties que nous souhaitons analyser. La simplification du modèle par restriction de la zone étudiée, en ne considérant que la partie haute du tronc par exemple, permet en outre de réduire et d'accélérer les calculs liés au déplacement de la chaîne.

Notons enfin que la modélisation s'appuie généralement sur des bases de données anthropométriques d'adultes mais qu'il existe aussi des modélisations issues de l'enfant, comme celle utilisée pour le robot NAO d'Aldebaran Robotics (figure 1.16).



FIGURE 1.16 – Le robot Nao possédant des paramètres dimensionnels proches de ceux d'un enfant de 8 ans.

1.2.1.2 Modélisation musculo-squelettique

Une approche récente consiste à construire un modèle musculo-squelettique. Dans ce cas, la modélisation segment/liaison pivot est toujours présente mais, cette fois-ci, les liaisons sont passives et sont actionnées par la tension de muscles virtuels qui s'apparentent à des câbles. C'est la longueur de ces câbles qui est calculée et qui détermine la valeur angulaire prise par la liaison pivot qui en dépend. La complexité du modèle s'en trouve accrue car, d'une part plusieurs muscles actionnent la même liaison, et d'autre part ces modèles privilégient une représentation plus fidèle sinon exhaustive du squelette. Cette augmentation de la complexité se justifie par la volonté de connaître l'origine musculaire des mouvements. Des exemples de ce genre de modélisation sont disponibles dans les figures 1.17 a), b) et c).

Le modèle de Nakamura [Nakamura 05] présenté figure (1.17 a) comporte des segments et des liaisons pivots inactives. Les segments sont de deux types, soit inactif et représentant les os (en blanc), soit actifs et représentent les muscles (jaunes). Ce modèle comporte 53 corps rigides et 366 segments à taille variable (muscles virtuels). L'animation de ce modèle requiert donc le calcul heuristique de ces 366 valeurs puis le calcul du modèle cinématique qui lie la variation de longueur de ces muscles à la variation angulaire des liaisons pivots associées. Le modèle de Lee [Lee 09] sur la figure 1.17 c) est quant-à lui un peu plus détaillé avec 68 "os" et 814 "muscles virtuels". Pour la simulation ciblée d'une articulation, il convient de simplifier

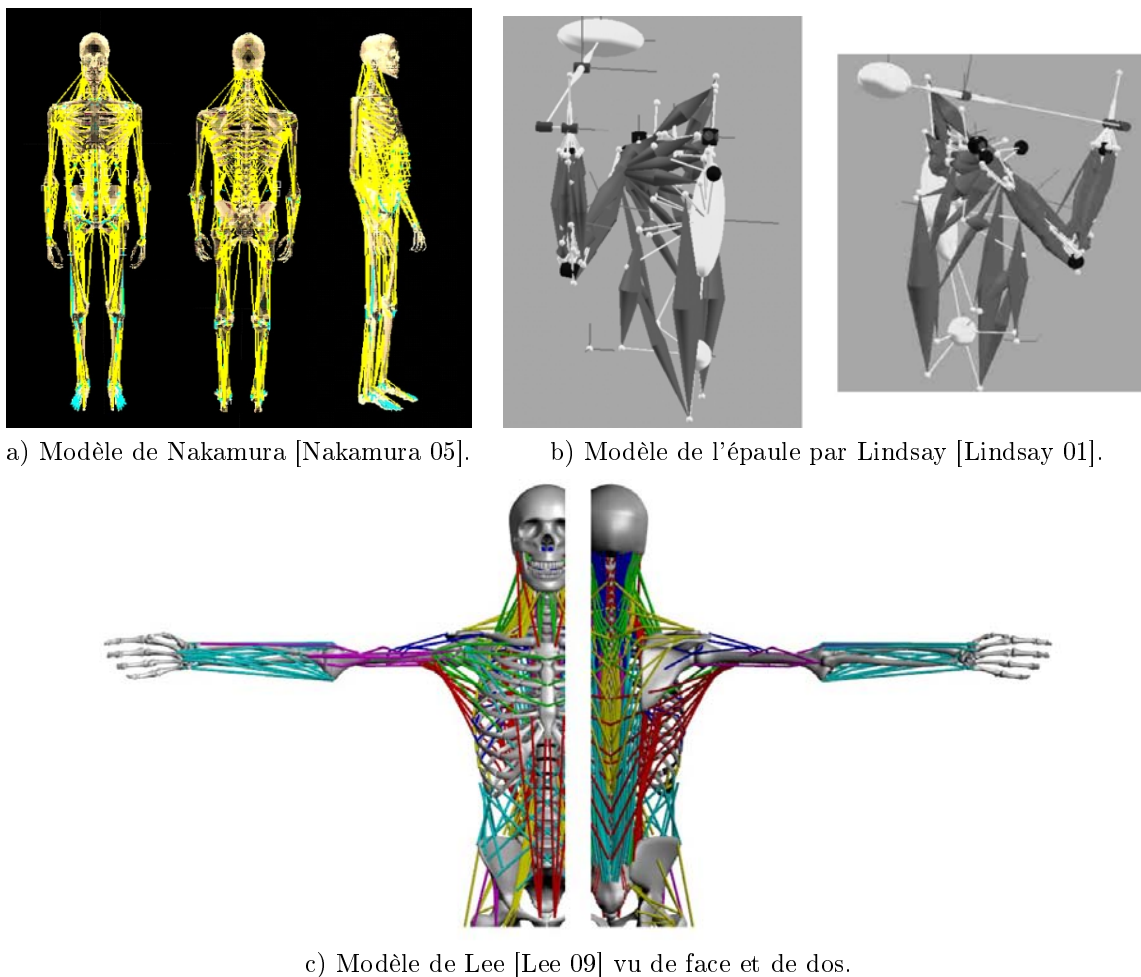


FIGURE 1.17 – Différents modèles de représentation utilisant squelette et muscles virtuels.

le modèle en ne reproduisant qu'une partie de l'anatomie de l'humain comme l'épaule que nous voyons sur le schéma 1.17 b).

Notons également que certains robots récents utilisent des actionneurs pneumatiques ou hydrauliques qui font office de muscles artificiels [Ku 08, Tondu 00, Sugisaka 06]. Ces muscles artificiels vont à la fois reproduire l'organisation spatiale des muscles réels, travailler de façon antagoniste comme sur l'humain, reproduire les mouvements de flexion extension des muscles et donc exercer un couple au niveau de l'articulation. Les muscles artificiels permettent en somme de reproduire plus finement le fonctionnement du système locomoteur humain en prenant en compte à la fois la disposition générale du squelette et celle du tissu musculaire.

1.2.1.3 Modélisation des éléments complexes

Certaines articulations de l'humain sont relativement complexes à retranscrire en robotique. C'est notamment le cas de la colonne vertébrale, de l'épaule, de la prono-supination dont on présente les modélisations usuelles.

La colonne vertébrale de l'homme est constituée de plusieurs vertèbres reliées entre elles par des disques intervertébraux. Ces derniers permettent un mouvement relatif des vertèbres. En robotique, la modélisation la plus simple et la plus couramment utilisée est une liaison rotule au niveau du bassin représentant les vertèbres lombaires ainsi qu'une autre rotule au niveau du cou représentant les vertèbres cervicales [Jung 10, Kaneko 04].

L'épaule est un ensemble dont la cinématique complexe implique dans certains cas de modéliser avec précision les différents déplacements de chacun des os. Les modélisations de Helm [Van Der Helm 94] et Maurel [Maurel 98] illustrées sur la figure 1.18 permettent de schématiser la cinématique de cet assemblage. Le mouvement de l'omoplate est par ailleurs modélisé de façon différente chez les deux auteurs mais permet de retranscrire le mouvement de glissement avec le thorax.

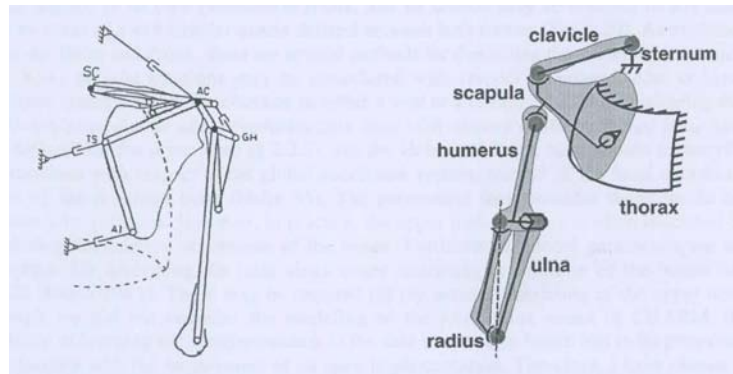


FIGURE 1.18 – Modèle de l'épaule de Helm [Van Der Helm 94] à gauche et celui de Maurel [Maurel 98] à droite

Le mouvement de prono-supination est généralement modélisé par une simple liaison pivot dont l'axe est aligné avec l'avant bras. Elle peut être située au niveau du coude ou au niveau du poignet selon le formalisme qui décrit le robot. Il existe, à notre connaissance, peu de modélisations sous système robotique utilisant des articulations actives qui reproduisent le déplacement imbriqué de deux os pour produire ce mouvement.

1.2.2 Modélisation de l'enveloppe externe

La modélisation graphique de l'humain est la plus connue du grand public, notamment dans les domaines du jeu ou du film d'animation. Cette modélisation s'appuie principalement sur l'enveloppe charnelle. Elle peut dans certains cas inclure des expressions faciales, l'élasticité de la peau, les cheveux, ... Les organes internes peuvent également être modélisés afin de restituer, par exemple, la contraction des muscles lors de la simulation de mouvement [Reynolds 04]. Ce type de représentation permet à l'œil humain de percevoir la scène de façon plus réaliste. Les entités virtuelles sont alors "humanisées" comme dans le cas des films d'animation. Ces modélisations très poussées utilisent des techniques d'animations basées sur de larges bases de mouvements pré-enregistrés et ne peuvent généralement pas être utilisées en temps réel.

Sans entrer dans la sophistication des techniques d'animation pour le jeu et le cinéma, l'enveloppe externe permet également de donner du volume au modèle robotique de l'appareil locomoteur. En effet, un modèle robotique se compose de segments permettant de représenter l'appareil locomoteur et ces segments traduisent simplement la distance qui séparent deux articulations. En associant à ces segments une enveloppe, il devient alors possible :

- de visualiser le mouvement du mannequin de manière semblable à l’observation d’un sujet humain,
- de détecter et d’éviter les collisions entre chacun des corps, mécanisme appelé *auto-collision* par la suite.

Les géométries associées peuvent avoir un maillage complexe ou résulter de la superposition de figures géométriques simples telles que des cônes, des cylindres, ... Cette prise en compte du volume permet donc d’accroître le réalisme de la simulation. Dans notre approche, nous retiendrons une enveloppe externe très simplifiée.

1.3 Techniques d’animation des humanoïdes

Nous nous intéressons ici aux techniques qui permettent de produire un mouvement synchronisé des différents corps composant un humanoïde. Nous citons pour cela deux principes différents : d’une part, la possibilité de calculer une évolution de ces différents corps à partir de la définition de la tâche à remplir et d’un modèle de l’appareil locomoteur, d’autre part, l’utilisation de postures d’humain ou d’humanoïde acquises pour re-jouer ces postures sur un mannequin. Nous parlons de *génération* ou *simulation* de mouvement dans le premier cas et de *rejeu* dans le second.

1.3.1 La génération de mouvement

Ce type d’approche est basé sur la donnée d’une tâche à réaliser, qui explicite l’évolution de certains corps particuliers (pieds pour la marche, mains pour la manipulation), et sur un modèle d’appareil locomoteur. La donnée peut-être uniquement caractérisée en terme de position et de déplacement, elle peut aussi comporter des informations de forces au contact de l’environnement. Le premier cas fait naturellement appel à des modèles cinématiques ; le second cas, à des modèles dynamiques [Kiss 02]. Ces modèles décrivent les relations entre l’évolution des liaisons composant l’appareil locomoteur et l’évolution de la tâche.

Le positionnement d’une main, pour une tâche de manipulation par exemple, peut être réalisé pour une infinité de postures différentes. On utilise le terme de *redondance cinématique* pour décrire ce type de situation. Ce problème lors de la simulation de mouvements est dit alors *mal posé* [Bernstein 67]. La question du réalisme des mouvements en découle puisqu’une infinité de postures va correspondre à la réalisation de la tâche prescrite mais que parmi celles-ci un grand nombre ne correspondront pas à des postures réalisées par un véritable humain. On dit alors que le problème est mal posé

Nous sommes donc amenés à considérer la mise en œuvre de critères qui viennent compléter la résolution pour une tâche donnée. Dans certaines techniques de génération de mouvements en robotique la solution correspond explicitement à l’optimisation d’un critère. Ainsi, pour les mannequins numériques et robots anthropomorphes, nous pouvons notamment citer les critères suivants :

- Minimisation du coût énergétique [Alexander 97],
- Critère de stabilité, pour la génération de trajectoire de marche [Liu 02],
- Minimisation du coût énergétique des moto-neurones lorsqu’on considère l’appareil locomoteur et son contrôle moteur [Taix 12],

Les méthodes cinématiques peuvent être mises en œuvre pour l’animation d’un avatar, de la cinématique d’un squelette, sans se soucier de la dynamique des corps et des causes qui engendrent ces mouvements. La position et la vitesse des corps sont contrôlées. Des extensions de ces méthodes appelées “Méthodes cinétiques” permettent d’ajouter le contrôle du centre de masse [Boulic 94] ou du ZMP¹ [Vukobratovic 04]. Ces méthodes sont employées en lieu et place des méthodes cinématiques lorsque l’équilibre du mannequin doit être garanti. Ces méthodes se subdivisent en plusieurs techniques :

1. Zero Moment Point : correspond au point d’application des forces statiques et dynamiques où le moment autour de l’axe horizontal est nul.

- Utilisation d'un modèle qui exprime la relation entre la situation d'un corps particulier (par exemple la main) et la valeur des différentes variables articulaires. L'utilisation d'un tel modèle s'avère particulièrement bien adaptée dans les cas où la situation d'un corps particulier nécessite une localisation précise (atteinte ou prise de pièce). Outre le fait de réaliser la tâche, il faut cependant penser à inclure d'autres objectifs afin de rendre l'animation réaliste (placement du regard, maintien de l'équilibre, ...). La cinématique inverse permet, connaissant la situation initiale et finale de la main, de produire des trajectoires articulaires. On distingue deux catégories de méthodes de cinématique inverse [Meredith 04] : les méthodes numériques, capables de traiter des systèmes complexes mais coûteuses en temps de calcul, et les méthodes analytiques qui sont plus rapides et mieux adaptées à des systèmes simples.
- Utilisation d'une bibliothèque prédéfinie de postures de référence : le mouvement de l'avatar se décompose alors en plusieurs phases, chacune marquée par une posture à un instant donnée. Le mouvement entre chaque phase est généré par interpolation. Cette technique permet d'alléger le travail de l'animateur mais se limite toutefois à de la simple animation sans interaction possible. Une amélioration est cependant proposée dans [Wiley 97] qui ajoute un contrôle de la main pour une situation de pointage. La position de la main est calculée pour chaque posture incluse dans la bibliothèque. La dernière phase du mouvement prend alors pour référence une posture issue d'une interpolation entre deux postures de référence dans lesquelles, la main se situe à proximité du point spécifié par l'utilisateur. Ces méthodes possèdent une parenté avec les méthodes de rejeu puisqu'elles s'appuient explicitement sur des postures pré-enregistrées et ne font pas appel à la tâche à réaliser. Néanmoins, elles en diffèrent en pratique lorsque l'interpolation devient une part prépondérante du mouvement.

Les méthodes dynamiques s'intéressent, contrairement aux méthodes cinématiques, aux causes même du mouvement. Elles s'appuient principalement sur les lois fondamentales de la dynamique et permettent le contrôle de la position, de la vitesse et de l'accélération de chaque partie de l'avatar ou du robot et intègrent explicitement les forces exercées sur et par l'environnement. Ces méthodes permettent dans leur principe de mieux traiter du mouvement et de l'interaction avec l'environnement [Saab 11]. Cependant, elles supposent de connaître l'ensemble des forces qui s'exercent sur le mannequin, que ce soit des efforts externes liés au contact entre l'avatar et son environnement ou des efforts internes qui sont difficilement mesurables.

Les approches contrôle moteur s'inspirent davantage du contrôle moteur humain. Elles permettent par exemple de simuler des activités neuronales, des activations de muscle et d'avoir un modèle plus réaliste dans son architecture [Todorov 02, Guigon 07, Tran 09]. Ces techniques reproduisent en partie le fonctionnement de l'humain dans lequel, le cerveau contrôle les muscles via un ensemble de mécanismes. Dans de tels cas, des méthodes permettent de limiter la redondance cinématique comme par exemple, la suppression de degré de liberté (certaines articulations ne sont pas utilisées pour réaliser la tâche) ou l'intégration d'une synergie entre les muscles (pour une action donnée, les activations de certains muscles sont couplées).

1.3.2 Techniques de rejeu associées à la capture de mouvement

La technique la plus "simple" pour réaliser un mouvement humain consiste à enregistrer la gestuelle d'une personne, puis à la copier. Les techniques de rejeu nécessitent d'une part l'utilisation d'un système de capture et d'autre part la mise en œuvre d'une méthode permettant d'adapter les mouvements enregistrés à l'humanoïde. Nous étudions ces deux aspects dans les sous-parties suivantes.

1.3.2.1 Système d'enregistrement du mouvement

Plusieurs techniques ont été mises au point afin de capturer le geste. Nous pouvons les séparer en 2 familles, avec d'un côté les mécanismes qui demandent une manipulation directe de l'appareil et de l'autre, ceux permettant d'enregistrer le geste sans lien mécanique avec le système de mesure.

Les interfaces robotiques : Les interfaces robotiques permettent de capturer la situation d'un corps de l'humain. Il s'agit de moyens de capture demandant à l'humain de manipuler généralement l'organe terminal d'un système robotique. Le sujet saisit alors une partie du robot et la déplace dans un volume qui est généralement de "petite taille". La configuration du robot est enregistrée à intervalle fixe, ce qui permet de déduire l'évolution de la situation de la main (ou d'un autre corps) au cours du temps. Parmi les systèmes les plus connus, nous pouvons citer le bras Virtuouse6D de chez Haption ([Haption 13] sur la figure 1.19 a) et le "Phantom omni haptic device" de la marque Geomagic (figure 1.19 c). Des systèmes plus imposants comme le Inca6D (figure 1.19 b), également de la marque Haption permettent d'avoir un volume de travail plus grand. Notons que ces systèmes sont particulièrement utilisés dans les simulations interactives, notamment dans le cas d'assemblage d'éléments grâce à leurs fonctions de retour d'effort qui permettent de restituer un contact entre deux éléments. Ces interfaces sont communément dites "haptiques". Le pilotage de tels systèmes permet également de guider la main de l'utilisateur pour la simulation de processus d'assemblage [Ladeveze 10] ou l'apprentissage de l'écriture [Bluteau 08].

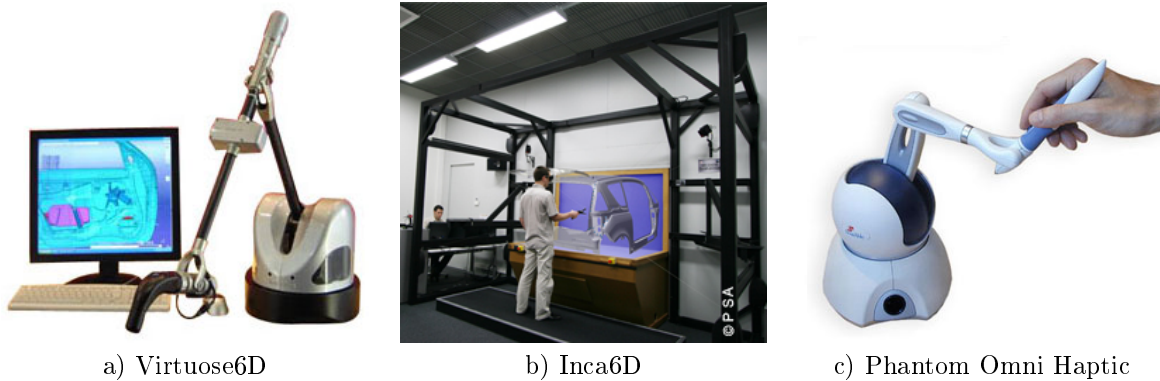


FIGURE 1.19 – Exemples d'interface pour l'enregistrement de mouvements.

Cependant, les systèmes de capture ne se limitent pas à la situation de la main (ou d'un autre corps) dans l'espace de la tâche. Les gants d'acquisition permettent de capturer la configuration des doigts d'une main (voir figure 1.20 a). Les goniomètres, utilisés principalement dans le domaine médical, permettent de mesurer la position articulaire d'une articulation et sont généralement couplés à un potentiomètre pour l'enregistrement des données. Des systèmes plus complets appelés exosquelettes (figure 1.20 b) permettent de saisir le mouvement de plusieurs articulations à la fois.

Le problème avec ce genre d'interface est qu'elles peuvent influencer le geste humain en raison des efforts nécessaire pour déplacer les organes terminaux. Rappelons également que les mouvements de l'humain sont restreints à cause du système robotique, ce qui en fait un autre désavantage.

Les systèmes de capture : Ils permettent une plus grande liberté de mouvement pour le sujet capturé puisque seuls des capteurs sont disposés sur le corps de la personne. Plusieurs techniques sont utilisées afin de localiser les corps dans l'espace :

- La capture optique associe un ensemble de marqueurs, filmés en permanence par plusieurs caméras. Les images de chacune des caméras sont ensuite intégrées dans un logiciel de triangulation qui calcule



a) Exemple de gant d'acquisition



b) Exemple d'exosquelette

FIGURE 1.20 – Exemples d'interfaces capturant les mouvements humains.

la situation de chaque marqueur dans la scène. La nature des marqueur peut être différente d'un système à l'autre (marqueurs passifs réfléchissant une onde lumineuse ou actifs émettant un signal lumineux). A noter que des systèmes tels que le kinect de Microsoft se passent de marqueur. Ce dernier utilise deux caméras et réalise un traitement d'image qui permet de reconnaître et localiser les membres humains grâce à des traitements d'image spécifiques.

- La capture électromagnétique se distingue par l'utilisation de capteurs actifs et d'un champ magnétique. La pièce où se déroule la capture est soumise à un champ magnétique. Les capteurs reçoivent et analysent l'intensité et la direction de ce champ afin de calculer leur situation dans la pièce. Ceux-ci envoient par la suite leur localisation à un logiciel dédié.
- La capture par accéléromètre utilise des capteurs actifs composés d'accéléromètres ou de centrales inertielles. Les marqueurs enregistrent à chaque instant l'accélération à laquelle ils sont soumis et réalisent une double intégration de ces données afin d'estimer leur situation. Une phase d'initialisation est nécessaire pour l'ensemble des marqueurs et doit se réaliser avant d'être attachés au sujet. Notons également qu'une erreur de localisation apparaît et augmente au cours du temps à cause de la double intégration nécessaire pour cette technique.

1.3.2.2 Méthodes de jeu

L'imitation du geste humain n'est pas un simple transfert du mouvement enregistré vers l'humanoïde. En effet, les disparités géométriques, cinématiques et dynamiques entre le sujet capturé et l'avatar ne permettent pas l'application directe du mouvement. Une adaptation du mouvement est donc nécessaire. Celle-ci peut se réaliser suivant différentes techniques, ces dernières étant choisies en fonction des objectifs à satisfaire.

Les géométries et cinématiques de l'avatar sont différentes par rapport à l'humain donc, le respect d'une posture ne permettra pas de respecter la situation d'un membre dans l'espace de la tâche et inversement. Par conséquent, l'adaptation du mouvement va entraîner une modification de l'action des liaisons. Afin de restituer au mieux la posture enregistrée, Multon *et al* [Multon 08] proposent la réalisation d'un squelette intermédiaire afin de faciliter le passage du mouvement humain vers l'humanoïde. Ce squelette dit "normé" reprend la situation des terminaisons de l'homme et admet un plan dans lequel viendront se positionner les articulations des coudes et des genoux (voir la figure 1.21).

Pour plus de réalisme, l'imitation du mouvement humain peut tenir compte des lois de la physique. Il est courant d'utiliser des modèles dynamiques dans lesquels nous ajoutons des contraintes de stabilité, notamment lors de mouvements de marche. Un exemple bien connu de l'utilisation de modèle dynamique est la danse du robot HRP-2 [Nakaoka 05] (voir la figure 1.22). Le mouvement humain a été enregistré hors ligne et les primitives de chaque articulation ont été extraites, pour chaque mouvement clé. Une méthode d'adaptation basée sur ces primitives va alors modifier l'action de chaque liaison afin de respecter à la fois l'équilibre du robot et ses capacités de déplacement.

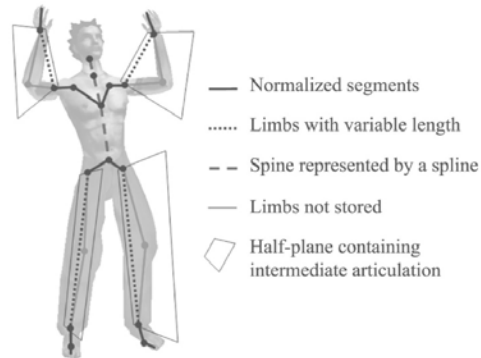


FIGURE 1.21 – Mannequin intermédiaire permettant de faire le lien entre l'être humain et l'humanoïde [Multon 08].

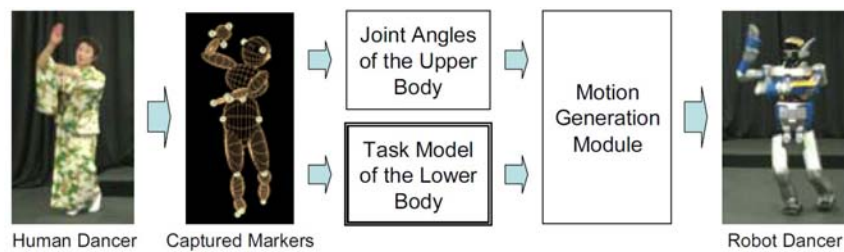


FIGURE 1.22 – Processus d'imitation du mouvement de danse pour le robot HRP-2 [Nakaoka 05].

Nous pouvons également citer les travaux de Saab [Saab 11] qui utilise un système de priorisation couplé à une méthode de résolution QP afin d'imiter des mouvements d'atteinte (voir la figure 1.23). Le sujet doit atteindre un certain nombre de points avec sa main gauche en se tenant debout sur son pied gauche (figure 1.23 a). Ce mouvement est ensuite rejoué avec une méthode cinématique (figure 1.23 b) et dynamique (figure 1.23 c).

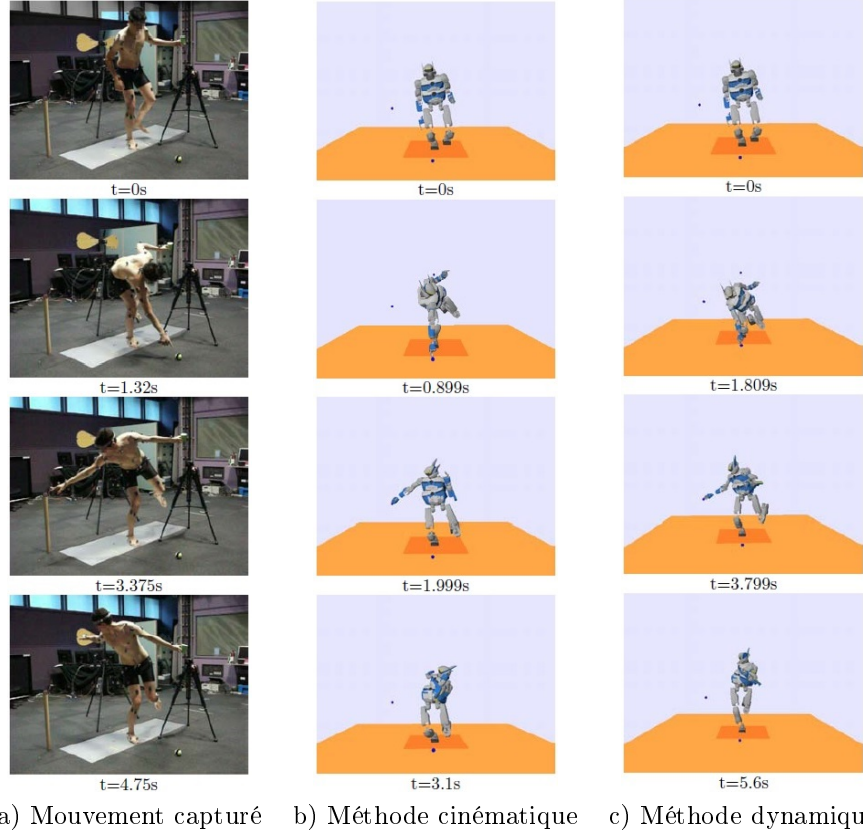


FIGURE 1.23 – Comparaison entre les méthodes cinématique et dynamique pour le rejou d'un mouvement d'atteinte [Saab 11].

Notons que dans tous les cas, le mouvement résultant sur l'avatar ou le robot est différent du mouvement capturé en raison des nombreuses différences entre les humains et leurs modèles.

1.3.3 Discussion

La simulation de la gestuelle humaine est un domaine riche qui met en jeu différentes méthodes et s'utilise principalement pour l'animation d'avatar, dans les jeux vidéos, pour l'immersion dans les simulations de réalité virtuelle, ou afin d'analyser de postes de travail. Prédire ou même re-jouer la gestuelle humaine est un enjeu complexe : la simulation requiert de construire des tâches qui produiront un mouvement réaliste, le rejou par exemple est notamment tributaire de la variabilité anthropométrique et du fait qu'on mesure le mouvement de l'enveloppe externe.

Nous nous focalisons sur un cas bien précis, celui des gestes d'atteinte répétitifs en position assise. Ce cadre qui restreint nos travaux nous permet de simplifier le problème. Nous détaillons dans les chapitres suivants les différents choix effectués pour la modélisation du problème et la technique d'animation utilisée.

1.4 Méthodes d'analyse des postes de travail

Deux raisons principales conduisent à mener une analyse des postes de travail : la recherche d'une meilleure productivité par l'évaluation des temps de cycle et l'analyse ergonomique afin d'évaluer le risque d'atteintes potentielles à la santé des opérateurs. Les opérateurs virtuels peuvent être utilisés dans les deux cas.

Lorsque la production est organisée de manière répétitive, il est essentiel de décrire avec précision les différentes phases mises en œuvre sur un poste de travail et d'évaluer le temps d'exécution. On peut alors utiliser différentes techniques telles que le MTM [MTM 96] permettant d'évaluer les temps d'exécution de différentes tâches codifiées : atteindre, saisir, tourner, etc. Cette technique très populaire dans l'industrie fournit le temps de cycle opératoire.

1.4.1 Analyse ergonomique

L'analyse ergonomique consiste en l'évaluation des risques conduisant à des atteintes à la santé des opérateurs et particulièrement à l'apparition de troubles musculo-squelettiques. Elle a notamment pour but d'adapter le poste de travail à l'opérateur. Les troubles musculo-squelettiques sont généralement le résultat de différents facteurs. Mc Phee [McPhee 87] quantifie leur facteur d'apparition en termes de :

- posture de l'opérateur,
- répétitivité du geste,
- cadence,
- masses des outils et objets utilisés,
- fatigue physique et mentale, ...

Cette évaluation peut se réaliser de différentes façons selon les techniques et moyens employés. Elle peut concerner un poste réel déjà en opération. Dans ce cas, l'évaluation pourra s'appuyer sur un questionnaire destiné à connaître le ressenti de l'opérateur. Elle peut aussi avoir pour objectif de concevoir un poste et dans ce cas, elle s'appuie sur une modélisation de l'opérateur et du poste [Ben Gal 02, Pappas 07]. Cette approche implique de reproduire et simuler la gestuelle humaine et pose donc un véritable challenge. Si on se limite aux seuls facteurs bio-mécaniques, les méthodes usuelles font appel à l'analyse posturale, aux efforts statiques et à la répétitivité.

L'évaluation de la posture d'un humain est difficile à obtenir de façon précise du fait de la complexité anatomique. Une première façon de faire s'appuie sur le ressenti des opérateurs et l'avis d'experts sur la base de techniques de questionnaires. Ces questionnaires permettent de qualifier le ressenti de l'opérateur au niveau de chacune des articulations concernées et de décrire de manière objectives les opérations menées sur le poste. Un exemple de ce type de questionnaire est présenté sur la figure 1.24 [Keyserling 93]. Par la suite, les résultats de ces questionnaires sont analysés et permettent de juger de la qualité ergonomique du poste [Eltayeb 09].

	never	sometimes	> 1/3 cycle
General Body Posture / Legs			
1. Standing stationary (no walking or leaning)	o	o	✓
2. Using a foot pedal while standing	o	✓	*
3. Lying on back or side	o	✓	*
4. Kneeling	o	✓	*
5. Knees bent or squatting	o	✓	*

FIGURE 1.24 – Exemple de questionnaire relatif à l'analyse des opérations réalisées sur le poste de travail [Keyserling 93].

Une façon complémentaire d'évaluer l'ergonomie d'un poste de travail est de mesurer la posture de l'opérateur. Cette mesure quantitative utilise des photos, des scanners [Lu 08, Lu 10] ou des enregistre-

ments vidéo [Juang 09]. Il s'agit ici de décomposer la tâche effectuée par l'opérateur en plusieurs opérations simples et d'étudier les différentes postures adoptées par la personne [Pappas 07].

Dans ces différents cas, sur la base de questionnaires ou d'acquisitions, la procédure d'évaluation des postes amène à classer la valeur de certaines articulations en différentes zones telles que : acceptable, peu acceptable, inacceptable. La caractérisation de ces zones est cependant difficile à obtenir de manière précise. En comparant diverses analyses telles que [McAtamney 93, NIOSH 91, Bernard 97, Marsot 06], nous pouvons observer qu'il n'existe pas de zone identique à l'ensemble des auteurs.

Comme pour l'analyse posturale, la détermination des efforts au niveau des articulations est difficile et repose soit sur des questionnaires, soit sur des outils analytiques basés sur la pesée d'objets ou la détermination de contraintes internes lorsque la technique utilise un mannequin numérique. [Ramsay 08] montre en effet qu'il est possible de rattacher les efforts musculaires à des moments au niveau des articulations. Dans [Chaffin 97], l'outil présenté permet de connaître les efforts s'exerçant au niveau de diverses articulations (lombaires, coudes, épaules, genoux, ...) en fonction de la posture adoptée, des dimensions anthropométriques et des forces extérieures. Les résultats issus de cette évaluation permettent de connaître quel pourcentage de la population est capable de réaliser l'activité analysée pour un effort donné. Cependant, il convient de rester prudent avec l'estimation des efforts internes puisqu'un rapport de l'INRS [Savin 12] conclut que ces outils ne sont "pas assez fiables" et peuvent conduire dans certains cas à une mauvaise appréciation des facteurs de risque biomécaniques.

L'impact de la répétitivité est difficile à mesurer. Nous trouvons dans [Keyserling 93] que le cycle de travail est le cycle pendant lequel l'opérateur exécute les mêmes actions. La notion de répétitivité peut être liée à la notion de cadence. D'ailleurs, les questionnaires permettant d'évaluer ce facteur s'appuient généralement sur la cadence. La productivité de l'opérateur est ainsi comparée aux différentes cadences. Les outils analytiques mesurent cette répétitivité de façon différente suivant les auteurs. Par exemple, Weston [Weston 97] mesure cette répétitivité par le nombre de mouvements extrêmes (amplitude supérieure à une certaine valeur angulaire) tandis que Meyer [Meyer 97] la mesure par le nombre de touchers de la main.

1.4.2 L'évaluation de l'ergonomie

Plusieurs outils et méthodes existent dans la littérature concernant la mesure de l'ergonomie d'un poste de travail ou de l'inconfort de l'humain et se basent quasiment toutes sur les trois facteurs évoqués plus haut. Ces mesures de l'ergonomie diffèrent d'une part, par les techniques d'évaluation employées pour chacun des facteurs et d'autre part par la façon d'assembler ces critères pour n'en former qu'un seul, qui devient par la suite une mesure globale. Nous détaillons dans cette sous-partie un certain nombre de ces méthodes.

L'analyse RULA [McAtamney 93] permet de mesurer le degré d'inconfort d'une posture donnée. La posture du mannequin ou de l'opérateur est comparée à celles enregistrées dans une base de données. Pour certaines articulations, un score est donné suivant leur position respective. Cette analyse s'appuie sur différents travaux pour estimer avec précision les zones d'inconfort. Nous pouvons citer [Grandjean 83, Chaffin 97, Drury 87]. Cette analyse tient également compte de la charge associée à la main de l'opérateur ainsi que de la durée de maintien dans cette posture. Le score total qui établit l'inconfort global de la posture est la somme pondérée de tous ces scores.

L'analyse de [NIOSH 91, Bernard 97] porte principalement sur le lever/déposer de charge. Cette évaluation prend en compte les postures de début et de fin de mouvement, la fréquence suivant laquelle l'activité est réalisée, la durée de cette activité au cours de la journée, la qualité de la prise et le poids de l'objet. En sortie de cette analyse, nous obtenons des estimations sur la contrainte physique subie par l'opérateur ainsi que la charge maximale admissible pour ce type d'activité.

Les travaux de Snook [Snook 91] permettent également de déterminer les différentes masses admissibles en fonction du percentile. Cette évaluation porte sur les activités de type lever/déposer d'objet et également sur des activités de type déplacer des objets. Snook s'est souvent attaché à connaître la masse maximale admissible que peut transporter un groupe de population et différencie les hommes des femmes dans ses

recherches [Snook 70, Snook 74].

OREGE (Outil de Repérage et d’Evaluation des GEstes), tel que défini dans le rapport [Aptel 00], a été développé par l’INRS² pour évaluer l’inconfort du membre supérieur d’un opérateur. Il tient compte de l’effort, de la répétitivité et de la position articulaire du poignet. L’effort demandé pour l’activité considérée est mesuré via une échelle d’auto-évaluation tandis que la position du poignet est relevée grâce à des enregistrements vidéos. Une comparaison par goniomètre fixé sur le poignet est cependant réalisée afin de valider les données issues de la vidéo.

1.4.3 L’utilisation des opérateurs virtuels

Le recours aux mannequins numériques date des années 60. Ils n’étaient à l’époque que de simples mannequins permettant, de façon statique, de représenter graphiquement un humain. Depuis les années 80 de nouveaux mannequins numériques pouvant se mouvoir et être associés à des logiciels de CAO ont été développés.

Nous pouvons citer le mannequin Jack créé par le Department of Computer and Information Science de l’Université de Pennsylvania. Celui-ci possède 69 segments dont 17 servant à représenter la colonne vertébrale. Il fait maintenant partie de la gamme d’outils de CAO proposés par la société UGS-PLM Solutions. Ce sont surtout les entreprises spécialisées dans l’automobile et l’aéronautique qui ont utilisé les mannequins virtuels pour le design des volumes intérieurs (comme le mannequin Ramsis [Ramsis 13] par exemple).

De nos jours, les mannequins numériques ont considérablement évolué et se destinent à des applications très diverses (la défense, le transport, la création de vêtements, ...) à l’image de “SantosHuman” [SantosHuman 13]. Les enveloppes charnelles sont devenues très réalistes et les tables anthropométriques associées à ces nouveaux mannequins sont parfois alimentées par de grandes bases de données (c’est le cas de MannequiPro qui intègre les données anthropométriques de la NASA et l’US Army). Ces mannequins s’intègrent de mieux en mieux dans les outils de conception à l’image du module Delmia Ergonomics Specialists [Delmia 13] (produit par Dassault Systemes et visible sur la figure 1.25).



FIGURE 1.25 – Exemple d’analyse posturale via le module Ergonomics Specialists de Delmia [Delmia 13].

Outre le fait de produire des mouvements et simuler un processus, l’utilisation de mannequins numériques permet l’analyse des contraintes internes. Il devient ainsi possible de calculer et mesurer les contraintes supportées par le corps et d’améliorer considérablement les analyses ergonomiques. Leur utilisation apporte une aide à la conception de poste de travail et permet, tout en tenant compte des contraintes bio-mécaniques, de :

- simuler une activité,
- vérifier les zones d’atteinte,
- valider le champ visuel de l’opérateur.

2. INRS : Institut National de la Recherche et de Sécurité.

Finalement, les mannequins numériques devraient permettre d'estimer à l'avance la posture d'un opérateur sur un futur poste de travail.

Aujourd'hui, ces opérateurs virtuels sont pilotables, soit au niveau de chaque articulation indépendamment, soit au niveau de certains corps (main, tête). La première méthode est extrêmement fastidieuse et n'assure pas que la posture soit réaliste. La seconde méthode requiert la connaissance de modèle de coordination entre les articulations et ne donne pas aujourd'hui de résultats satisfaisants. Compte tenu du temps requis pour créer des postures, ces outils ne sont pas à l'heure actuelle véritablement utilisés pour générer des séquences réalistes sur poste de travail.

1.5 Conclusion

Dans le cadre de cette thèse, nous cherchons à faire un schéma de génération automatique de mouvements réalistes pour simuler des gestes d'atteinte. Ce chapitre a permis de faire un rapide tour d'horizon des constituants et du contexte de notre étude. Dans ce but, nous avons rapidement décrit l'appareil locomoteur humain. Les principales articulations ont été présentées et certaines difficultés relatives aux complexes articulés tels que l'épaule pour lesquels, les mouvements relatifs entre chaque corps sont difficilement appréciables, ont été rappelées.

Dans la seconde partie, les modélisations sous système robotique du corps humain ont été présentées. L'accent a été mis dans un premier temps sur l'appareil locomoteur, à la fois sur l'agencement des liaisons et sur le choix des actionneurs : liaisons pivots, ou segments de longueur variable, selon que le modèle fait apparaître ou non les muscles actionnant les liaisons. Puis la nature et le rôle de l'enveloppe externe ont été présentés et discutés : en effet, celle-ci définit à la fois le rendu visuel du mannequin qui s'avère nécessaire pour juger de la pertinence du geste réalisé et est nécessaire pour traiter des questions d'auto-collision.

Une troisième partie a été consacrée aux techniques d'animation. Les techniques de simulation cinématiques et dynamiques ont été présentées puis les techniques de re-jeu basées sur la capture de mouvement ont été discutées.

Enfin, nous avons évoqué l'analyse des postes de travail principalement sur le plan ergonomique. Les techniques classiques de questionnaire ont été présentées puis l'accent a été mis sur la récente utilisation des mannequins numériques à des fins d'analyse posturale.

Chapitre 2

Modélisation

Dans ce chapitre, nous nous attachons à modéliser les éléments constitutifs qui permettent d'analyser et de simuler le geste humain sur un poste de travail. Dans la mesure où nos travaux consistent à confronter les données issues de la mesure d'un phénomène et celles produites en simulation, il est essentiel de définir le système étudié, les variables concernées et leur évolution. Par conséquent, nous avons besoin de modéliser :

- la tâche, le poste de travail et la séquence de travail associée,
- l'opérateur,
- la façon dont la personne réalise la tâche.

Modéliser la tâche revient à considérer différents aspects :

- l'espace dans lequel est défini la tâche et la nature des données imposées : position d'un point et/ou orientation d'un corps,
- les différents paramétrages possibles de cette information,
- la mesure et l'estimation des performances dans l'espace de la tâche.

Modéliser l'opérateur revient à :

- définir un modèle de l'opérateur, quantifier les grandeurs variables et paramétrer les constantes caractéristiques,
- mesurer, comparer deux états différents de l'opérateur.

Modéliser la façon dont l'opérateur réalise la tâche nécessite :

- de définir un modèle de commande, une relation entrées-sorties,
- de mettre en œuvre des modèles paramétrables de commande.

La mise en place de ces modèles définit le cadre qui permet :

- de collecter et d'organiser les données acquises,
- de simuler automatiquement le mouvement par la mise en œuvre de la relation entrées-sorties, de paramétrer cette simulation,
- de comparer les résultats de l'acquisition et de la simulation.

Le paramétrage de la commande et la comparaison des résultats obtenus nécessite de définir les métriques adaptées. On peut en effet :

- mesurer des distances dans l'espace cartésien et comparer la position et l'orientation relative des mains de l'opérateur, par exemple,
- mesurer des distances obtenues par la mesure des valeurs angulaires des articulations qui composent le corps de l'opérateur,
- ou encore, définir la qualité de la relation entrées-sorties.

La mise en place de ces outils de mesure de la performance fait à nouveau appel à des choix de représentation, de paramétrage et de pondération. Elle pose également la question de l'optimisation des résultats dans les métriques retenues.

Dans les parties suivantes, nous nous attachons donc à définir ces quantités, faire apparaître les différents paramètres, variables et représentations ainsi que les métriques qui permettront de quantifier la performance et de modifier le paramétrage.

2.1 Modélisation de la tâche

Un des paramètres d'entrée de notre problème est donné par la tâche à accomplir. Cette section présente notre façon de modéliser le poste de travail, la séquence de travail associée et l'interprétation des différentes tâches implicites qui en découlent.

La notion de poste de travail est caractérisée par une description géométrique du lieu qui peut contraindre le mouvement et par une séquence d'actions à mener à bien, éventuellement de manière répétitive, dans cet environnement. Nous nous focalisons sur les postes d'assemblage en position assise avec une forte répétitivité des gestes qui correspondent à un grand nombre de situations industrielles du secteur secondaire.

Notre étude n'intègre pas les notions de prise et de transport d'objet, nous restons sur des mouvements d'atteinte avec la (ou les) main(s) dans lesquels le regard peut être sollicité. Cependant, nous prenons en exemple des postes de travail réels dont nous ne garderons que les positions des mains par la suite.

Nous commençons par nous intéresser aux gammes d'assemblage qui décrivent l'ensemble des opérations que doit effectuer l'opérateur. Un travail, simple ou complexe, faisant parfois appel à des gestes techniques est constitué d'une suite chronologique de plusieurs phases élémentaires (Prendre une pièce, visser, [Barlier 03]).



FIGURE 2.1 – Exemple d'une opératrice procédant au collage d'un filtre à air.

<i>N</i> ^o	Désignation
1	Prendre le filtre en main
2	Positionner le filtre sur la colleuse
3	Déposer la colle sur le bord du filtre
4	Mettre en forme le filtre
5	Encoller le filtre
6	Déposer le filtre fini dans le bac

TABLE 2.1 – Sous-phase d'assemblage du filtre à air.

Les tâches liées aux postes de travail industriels sont habituellement décomposées en séquence à des fins de description, de nomenclature et d'évaluation de l'ergonomie et des temps de cycle. Une séquence peut être ainsi décomposée en une succession de phases élémentaires. Un exemple de séquence composée de 6 phases est illustré par la figure (2.1) et synthétisé dans la table (2.1).

La décomposition est fonctionnelle et ne pré-suppose pas de découpage régulier en terme de temps de cycle ou de distance parcourue. En particulier, la durée des phases varie et différentes méthodes de prédiction du temps opératoire pour chaque phase sont utilisées. L'une de ces méthodes est le "Measurement

Time Method" – ou MTM – ([MTM 96]) qui fournit un calcul du temps opératoire basé principalement sur la distance entre deux positions successives des mains d'une part, sur le contexte du geste (lieu final connu, précision avec laquelle la position finale de l'objet est connue (vrac, par exemple), geste nécessitant un suivi visuel, etc) d'autre part.

2.2 Situation d'un solide

Chacune des phases élémentaires requiert de définir géométriquement la position et l'orientation des objets de la scène et des mains de l'opérateur. Pour cela, nous nous plaçons dans un repère affine orthonormé direct noté $\mathcal{R}_0 = (0_0, \mathcal{B}_0)$ ramené à une origine 0_0 où $\mathcal{B}_0 = (\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ constitue une base vectorielle orthonormée directe. Nous notons $\mathcal{R}_1 = (0_1, \mathcal{B}_1)$ où $\mathcal{B}_1 = (\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$, un second repère orthonormé direct lié au corps rigide dont nous souhaitons caractériser la position de tous les points dans \mathcal{R}_0 . Ceci est équivalent à connaître la position d'un point particulier du solide par rapport à \mathcal{R}_0 ainsi que la rotation qui transforme \mathcal{B}_0 en \mathcal{B}_1 . Dans la suite de ce mémoire, nous nommons *situation* d'un corps solide ce couple (position, orientation) ou (translation, rotation) pour lequel on pourra utiliser différentes représentations.

2.2.1 Paramètres de position

La position d'un point est définie dans \mathbb{R}^3 et est donc représentée globalement par un jeu de 3 paramètres indépendants. Les coordonnées cartésiennes (l, m, n) sont le choix le plus usuel pour paramétrer la position d'un point dans \mathcal{R}_0 . La position d'un point se définit donc par un jeu de trois paramètres indépendants que l'on notera par la suite :

$$P = \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dans certains cas très spécifiques, il pourra être intéressant d'utiliser des coordonnées sphériques ou cylindriques.

2.2.2 Paramètres d'orientation

L'orientation d'une base vectorielle orthonormale \mathcal{B}_1 dans une autre base vectorielle orthonormale \mathcal{B}_0 , ou de manière équivalente la rotation permettant de transformer l'une en l'autre, peut se traduire de différentes manières. Si on accepte la restriction de représentation qui consiste à ne considérer pour ces transformations que celles concernant des bases vectorielles orthonormées *directes*, alors ces transformations appartiennent au groupe des rotations $SO(3)$ [Trojanov 09, Renaud 96] – ou groupe Spécial Orthogonal de dimension 3. $SO(3)$ possède une structure de variété de dimension 3 et chacun de ses éléments peut donc être repéré *localement* à l'aide d'une représentation – ou carte – à 3 paramètres de manière analogue à ce qui se passe *globalement* dans \mathbb{R}^3 .

La représentation la plus classique de ces transformations est celle d'une matrice de rotation de déterminant égal à 1. C'est une matrice 3×3 dont les 9 paramètres non-indépendants sont obtenus en faisant le produit scalaire deux à deux des vecteurs de la base \mathcal{B}_1 dans ceux de la base \mathcal{B}_0 . C'est une matrice orthogonale et les 9 paramètres sont liés par 6 relations qui traduisent que les vecteurs sont normés et orthogonaux. La matrice de rotation R_{01} associée à \mathcal{B}_0 et \mathcal{B}_1 peut ainsi s'écrire :

$$R_{01} = \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x \\ x_y & y_y & z_y \\ x_z & y_z & z_z \end{bmatrix} \text{ ou encore } R_{01} = \begin{bmatrix} \vec{x}_1 & \vec{y}_1 & \vec{z}_1 \end{bmatrix}_{\mathcal{B}_0} \text{ ou encore } R_{01} = \begin{bmatrix} \vec{x}_0^t \\ \vec{y}_0^t \\ \vec{z}_0^t \end{bmatrix}_{\mathcal{B}_1} \quad (2.2)$$

où l'ensemble des 9 paramètres $(x_x, y_x, z_x, x_y, y_y, z_y, x_z, y_z, z_z)$ constituent les *cosinus directeurs* et résultent du produit scalaire des différents vecteurs de base. Cette représentation étant très redondante, on lui préférera parfois le sous-ensemble $(x_x, y_x, z_x, x_z, y_z, z_z)$ dit des *cosinus directeurs partiels* qui conserve la même information sous une forme plus concise et qui permet de retrouver rapidement les 3 composantes (x_z, y_z, z_z) par simple produit vectoriel des 2 vecteurs qui le composent.

2.2.3 Représentation de la situation d'un solide

2.2.3.1 Matrices de transformation homogène

Les matrices de transformation homogène sont une façon de représenter une isométrie directe par une matrice 4×4 . Elles sont construites, sous la même hypothèse que précédemment *i.e.* pour des rotations définies dans $SO(3)$, dans le groupe des déplacements notés $SE(3)$, et appelé groupe Spécial Euclidien de dimension 3. Lorsque des changements successifs de repères affines sont nécessaires, le formalisme des matrices homogènes s'avère particulièrement adapté car il permet de coder n changements de repères affines successifs en le produit de n matrices homogènes. La relation (2.3) permet de comprendre l'agencement des paramètres de translation et de rotation dans une matrice homogène qui traduit la transformation de \mathcal{R}_0 à \mathcal{R}_1 .

$$T_{01} = \left[\begin{array}{ccc|c} R_{01} & P_{01} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} x_x & y_x & z_x & l \\ x_y & y_y & z_y & m \\ x_z & y_z & z_z & n \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (2.3)$$

où P_{01} regroupe les coordonnées cartésiennes d'un point 0_1 du solide dans \mathcal{R}_0 et R_{01} décrit l'orientation de la base vectorielle \mathcal{B}_1 dans \mathcal{B}_0 .

Les matrices de transformation homogène sont une façon efficace de restituer la situation d'un solide et de calculer des changements de repère successifs. Cependant, cette représentation, issue directement des composantes des bases vectorielles, comprend un nombre important de paramètres et ne permet pas d'accéder directement aux caractéristiques intrinsèques de ces transformations. C'est une représentation à 12 paramètres pour des objets définis dans un espace de dimension 6, donc qui peut-être *localement* décrit par 6 paramètres. On pourra préférer aux matrices homogènes, en fonction des développements à mener et des propriétés à exploiter, d'autres représentations plus concises, en particulier celles utilisant un nombre minimal ou quasi-minimal de paramètres, et plus proches d'une formulation canonique.

La position est définie dans \mathbb{R}^3 et on utilisera la plupart du temps les coordonnées cartésiennes. Les paramètres d'orientation nécessitent une étude plus approfondie et différents choix de représentation vont présenter des mérites différents.

2.2.3.2 Paramètres d'orientation

Au-delà des matrices orthogonales, les représentations usuelles de l'orientation sont constituées des systèmes à 3 angles indépendants (Euler, Bryant, Tangage-Roulis-Lacet, ...) et des systèmes à 4 paramètres tels que les quaternions ou la représentation (vecteur, angle).

2.2.3.2.a Systèmes de 3 angles indépendants

Un exemple répandu de systèmes de 3 angles indépendants est celui des angles de Bryant [Craig 86, Renaud 96] qui représente l'orientation d'un corps à l'aide de 3 rotations successives (rx, ry, rz) autour des axes $(\vec{z}, \vec{y}, \vec{x})$ (voir la figure 2.2). Ainsi, le vecteur \mathbf{X}_r définissant l'orientation de la base \mathcal{B}_1 dans la base \mathcal{B}_0 se caractérise par (2.4).

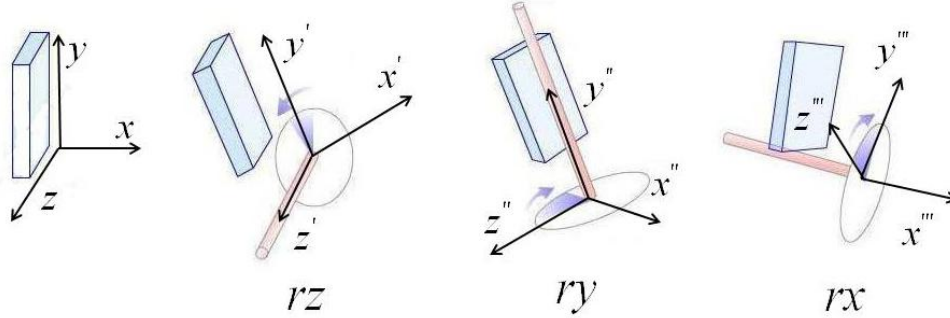


FIGURE 2.2 – Schéma représentant la rotation d'un solide suivant 3 rotations successives autour des axes z , y et x .

$$\mathbf{X}_r = \begin{bmatrix} rx \\ ry \\ rz \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$SO(3)$ est une variété qui n'est que *localement* isomorphe à \mathbb{R}^3 , il n'existe donc pas de paramétrage à 3 paramètres qui permette de décrire de manière unique tous ses éléments. Par conséquent, la relation entre le vecteur \mathbf{X}_r et la matrice de rotation R_{01} n'est pas bijective. C'est l'origine du problème dit du "Gimbal Lock" [Dam 98] [Choe 04] qui intervient lorsque deux des axes qui réalisent la rotation sont portés par une même direction.

Pour résoudre cette indétermination, on pourrait envisager de constituer un atlas de cartes locales à 3 paramètres mais le choix le plus courant hormis celui des matrices de rotation est de considérer un système de paramétrage *global* à 4 paramètres.

2.2.3.2.b Représentation à 4 paramètres

Depuis Euler [Murray 94, Renaud 96], nous savons qu'il est possible de traduire une rotation quelconque (ou un changement de base vectorielle quelconque) par le choix d'un vecteur $\vec{\eta}$ autour duquel une rotation d'amplitude θ est réalisée. Plus exactement, *toute rotation finie peut être exprimée comme une rotation unique d'angle θ autour d'un axe de direction unique $\vec{\eta}$, de norme unité*. Un choix naturel de paramétrisation des rotations peut donc être constitué par les composantes de $\vec{\eta}$ et l'amplitude de la rotation θ . C'est la représentation (vecteur, angle) parfois appelée (axe, angle). θ et $\vec{\eta}$ sont également appelées *coordonnées canoniques* de la rotation.

Cette représentation à 4 paramètres d'objets définis sur une variété à 3 dimensions permet de décrire toutes les rotations. On dispose des formules suivantes pour effectuer le passage de la représentation par les matrices orthogonales (R) à la représentation (vecteur, angle) :

$$\theta = \arccos\left(\frac{\text{trace}(R) - 1}{2}\right) \quad \vec{\eta} = \frac{1}{2 \sin \theta} \begin{bmatrix} y_z - z_y \\ z_x - x_z \\ x_y - y_x \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Inversement, si on note $\hat{\eta}$ la matrice de pré-produit vectoriel associée à $\vec{\eta}$ et qui permet de réécrire le produit vectoriel $\vec{\eta} \times \vec{v}$ en $\hat{\eta}\vec{v}$, alors on peut écrire l'équation différentielle : $\dot{R} = \vec{\eta} \times R$ en : $\dot{R} = \hat{\eta} R$ dont l'intégration sur $[0, \theta]$ a pour solution : $R = \exp(\hat{\eta}\theta) = I + \hat{\eta} \sin \theta + \hat{\eta}^2 (1 - \cos \theta)$.

Notons, d'une part, que les représentations $(\vec{\eta}, \theta)$ et $(-\vec{\eta}, -\theta)$ fournissent la même rotation et, d'autre part, que la rotation identité $R = I$ possède une infinité de représentations pour lesquelles $\theta = 0$ et $\vec{\eta}$ est quelconque.

2.2.3.2.c Les quaternions

Les quaternions jouent un rôle analogue pour les rotations dans l'espace à celui que jouent les nombres complexes pour les rotations dans le plan. Ils sont constitués de quatre paramètres [Hamilton 44, Dam 98, Kremer 08] et peuvent s'écrire :

$$H = \delta.1 + h_1.\vec{i} + h_2.\vec{j} + h_3.\vec{k} = \delta.1 + \vec{h} = (\delta, \vec{h}) \quad (2.6)$$

Chaque quaternion se décompose en un scalaire δ et trois autres éléments (h_1, h_2, h_3) qui forment le vecteur \vec{h} . Le conjugué \bar{H} du quaternion $H = (\delta, \vec{h})$ s'écrit $\bar{H} = (\delta, -\vec{h})$. En raison des relations de conjugaison de $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, le produit non commutatif de deux quaternions peut s'écrire en utilisant uniquement les produits scalaires et vectoriels de \mathbb{R}^3 sous la forme :

$$H_1 H_2 = (\delta_1 \delta_2 - \vec{h}_1^t \vec{h}_2, \delta_1 \vec{h}_2 + \delta_2 \vec{h}_1 + \vec{h}_1 \times \vec{h}_2) \quad (2.7)$$

La norme usuelle s'écrit :

$$\|H\| = \sqrt{\|H\bar{H}\|} = \sqrt{\delta^2 + h_1^2 + h_2^2 + h_3^2} = \sqrt{\delta^2 + \|\vec{h}\|^2} \quad (2.8)$$

et coïncide avec la norme euclidienne dans \mathbb{R}^4 . Il est possible de construire un quaternion de norme égale à l'unité – ou *quaternion unitaire* – à partir de la représentation (vecteur, angle) grâce à la formule suivante :

$$H = \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \vec{\eta} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \quad (2.9)$$

Nous pouvons également obtenir la représentation sous la forme (vecteur, angle) à partir d'un quaternion unitaire par :

$$\theta = 2\arccos(\delta) \quad (2.10)$$

$$\vec{\eta} = \begin{cases} \frac{\vec{h}}{\sin \frac{\theta}{2}} & \text{si } \theta \neq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.11)$$

L'intérêt principal des quaternions unitaires est qu'il fournissent une représentation globale à 4 paramètres sans singularité des rotations. Par contre, il est important de noter que l'ensemble des quaternions unitaires ne se confond pas avec $SO(3)$ mais forme un revêtement double du groupe spécial orthogonal $SO(3)$ ce qui signifie que deux quaternions opposés, $H_+ = (\delta, \vec{h})$ et $H_- = (-\delta, -\vec{h})$, correspondent à la même rotation.

2.2.3.2.d Représentation de la situation

La position P d'un point est définie dans \mathbb{R}^3 et se définit la plupart du temps via les coordonnées cartésiennes. Pour la rotation R associée à l'orientation d'un corps par rapport à un autre, on pourra donc utiliser les différentes représentations : cosinus directeurs partiels, quaternions, coordonnées canoniques, systèmes de 3 angles et on pourra passer de l'une à l'autre au prix de transformations *presque partout* bi-univoques. En pratique, la situation d'un solide pourra donc être définie :

- localement par un vecteur composé de 6 paramètres si on choisit une représentation de l'orientation par un système de 3 angles,
- ou encore par un vecteur à 7 paramètres si une représentation de type (axe, angle) est retenue,
- soit encore par un vecteur à $9 = 3 + 6$ paramètres si la rotation est représentée par les cosinus directeurs partiels.

Ce vecteur, noté \mathbf{X} , s'écrira :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_p \\ \mathbf{X}_r \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Notons d'ores et déjà qu'en termes d'orientation, il peut être judicieux de définir la tâche par un système de 3 angles puis de mener les différents calculs de traitement des données ou de simulation de mouvement avec d'une part des matrices de rotation, et d'autre part une représentation à 4 paramètres.

2.2.4 Définition de la tâche : contraintes explicites et implicites

Si nous observons un poste d'assemblage découpé en phases comme dans l'exemple de la figure 2.1, nous observons que pour chacune des phases, la (ou les) main(s) de l'opérateur occupe(nt) des situations bien précises afin de manipuler les différents objets. La situation des objets qui composent le poste de travail ou qui sont manipulés lors de la séquence est une donnée d'entrée de la simulation de mouvements humains sur poste de travail. Ainsi, chaque phase peut être caractérisée par une situation initiale et finale de la main. La tâche peut ainsi être décrite en faisant abstraction de la ressource qui manipule (humain ou robot) car cette description ne fait appel qu'au travail à effectuer.

Cette pratique est classique en robotique où l'on emploie le terme d'*espace opérationnel* pour désigner l'espace dans lequel la situation des repères de manipulation est définie. De manière plus générale, l'action des ressources (humain et/ou robots) va fournir des résultats - des sorties - tels que la position d'une main ou la convergence d'un regard sur un point donné : on parle alors plus généralement de *fonctions de sortie* qui ne traduisent que partiellement l'état de la ressource, pour reprendre un terme consacré d'automatique, ou de *fonctions de tâche* [Samson 91], en robotique.

Remarquons cependant que certaines tâches ne nécessitent pas de définir complètement la situation de la main : à titre d'exemple, la saisie d'un objet cylindrique laisse libre une rotation autour de l'axe du cylindre. Par ailleurs, certaines actions ne sont traditionnellement traduites que par des contraintes de position et dans ce cas seulement 3 composantes seront nécessaires.

Lors de la définition d'une séquence de travail, on distingue globalement des actions qui requièrent de *manipuler* et de *regarder*. Les tâches de manipulation imposent la situation d'une (ou des) main(s). La vérification d'une tâche de regard impose la situation de la tête. Ces deux types de contraintes de situation sont *explicites* dans la définition de la séquence. Elles apparaissent notamment dans le calcul des temps de cycle par des méthodes de type MTM, ou encore lors d'évaluations ergonomiques. A titre d'exemple, une tâche qui requiert une manipulation à deux mains et le placement du regard sera définie par un vecteur qui agrège la situation des différents corps concernés de la manière suivante :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{\text{maind}} \\ X_{\text{maing}} \\ X_{\text{regard}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

En pratique, d'autres contraintes influent sur le processus. D'une part, l'environnement de travail contraint géométriquement le mouvement. D'autre part, la mécanique humaine impose ses propres contraintes : les contraintes liées aux butées articulaires, celles liées à l'*auto-collision* entre les différents corps (bras et tronc pour l'essentiel) ou encore celles de la conservation de l'équilibre. Dans ce dernier cas, la contrainte associée à l'équilibre peut se ramener à restreindre la position du centre de gravité et est donc dépendante du positionnement relatif des différents corps. Globalement, le mouvement est contraint explicitement par les tâches à réaliser et implicitement par la mécanique humaine et l'environnement.

2.2.5 Synthèse

Nous avons défini une séquence de travail par une succession de phases, de tâches élémentaires. Ces phases sont définies par la donnée de la valeur initiale et finale d'un vecteur \mathbf{X} . Celui-ci décrit la situation de plusieurs corps dans l'espace de la tâche. S'il est facile de décrire la position d'un corps dans l'espace, nous avons vu qu'il est plus difficile dans le cas de l'orientation et que plusieurs représentations existent. Ces dernières peuvent se définir sur seulement 3 paramètres (angle d'Euler) mais sont sujettes à des blocages ("gimbal lock"), ou plus de 3 paramètres comme les quaternions, la représentation (axe, angle) et les matrices de rotation sans problème de singularité. Il existe évidemment des liens entre ces différentes représentations pour passer de l'une à l'autre. Nous verrons par la suite que toutes ces représentations sont utilisées pour décrire la tâche effectuée par l'humanoïde, paramétrer les mouvements, calculer des consignes, ...

Enfin, nous avons vu que des contraintes implicites peuvent s'ajouter au mouvement. Le déplacement des mains va impliquer un déplacement de la tête (par exemple) afin d'améliorer le réalisme de la scène.

2.3 Modélisation de l'humain

Dans cette partie, nous présentons les choix de modélisation effectués pour les mannequins qui seront utilisés en simulation. Cette modélisation peut comprendre différents niveaux de description selon les objectifs attendus. On peut notamment imaginer qu'une représentation des phénomènes énergétiques ou encore de certaines questions d'ergonomie est meilleure dans le cas d'une modélisation du système musculo-tendineux [Murai 08].

Dans notre étude, nous avons fait le choix de modéliser les mannequins à l'aide des outils de la mécanique du solide, en faisant l'hypothèse de corps rigides et de liaisons idéales, et en reprenant les outils de la robotique. Le mannequin est donc composé de corps solides reliés par des liaisons idéales. Ces mannequins ont été créés dans le cadre du simulateur OLARGE-TMS [Hue 08] et les différents choix concernant le respect des caractéristiques anthropométriques :

- masses et inerties,
 - modélisation des articulations (situation, cinématique et limitation du débattement),
 - respect des caractéristiques en fonction du percentile,
- sont précisés dans le paragraphe suivant.

2.3.1 Modélisation statique

Nous définissons dans un premier temps des caractéristiques dimensionnelles, massiques et inertielles de chacun des corps qui vont composer notre mannequin.

2.3.1.1 Anthropométrie

L'anthropométrie est l'étude des paramètres corporels. Le corps humain peut se décomposer en plusieurs segments, plusieurs parties [Hanavan 64]. Le nombre de données pour paramétrer un humain dépend essentiellement de cette décomposition. Ainsi, 242 données étaient nécessaires dans les années 80 (sous le programme informatique de collecte des données nommé "ANSEPA"). De nos jours, la compréhension biomécanique de l'humain nous permet de le représenter par 133 paramètres collectés en une vingtaine de minutes avec le système informatique "SEGP" [Hatze 05].

2.3.1.1.a Squelette

Nous avons fait le choix de mannequins qui reprennent les caractéristiques dimensionnelles de l'humain "moyen", correspondant au 50^e percentile, à partir de la table anthropométrique fournie par Drillis et Contini [Drillis 66] et reprise dans les ouvrages classiques (e.g. [Winter 90]). En moyenne, les longueurs segmentaires sont uniquement fonction de la taille (H) de l'homme comme représenté sur la figure 2.3. Bien que les longueurs segmentaires de chaque individu ne soient pas strictement proportionnelles à sa hauteur [Cloutier 12], cette approximation est celle que nous retenons pour nos modèles.

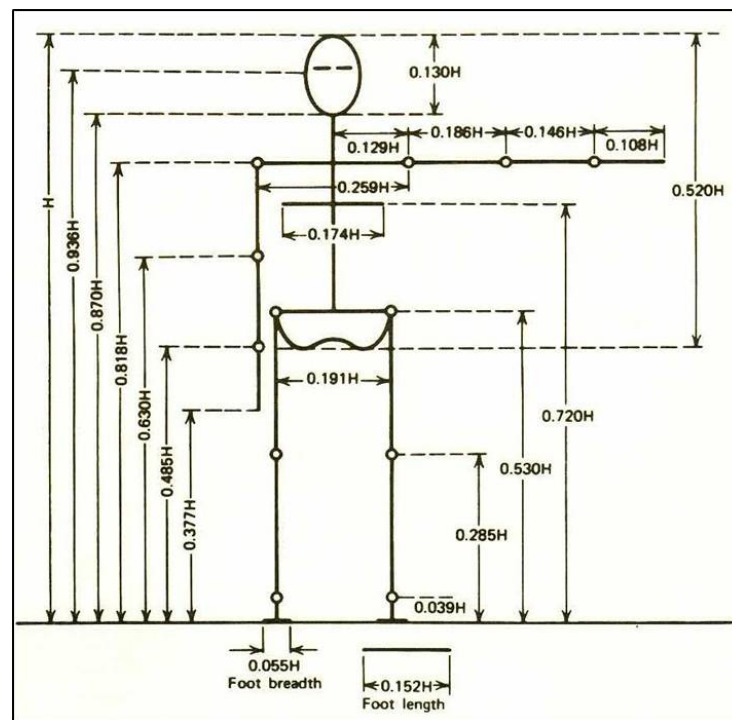


FIGURE 2.3 – Table anthropométrique représentant la longueur de chaque segment en fonction de la hauteur totale (H) de la personne (issu de [Winter 90])

2.3.1.1.b Enveloppe extérieure

Nous donnons à notre mannequin une enveloppe charnelle dont les dimensions correspondent à celles de l'être humain moyen. Cette enveloppe charnelle recouvre chaque partie du corps et est constituée de formes géométriques simples [Hanavan 64, Hatze 80, Jensen 78] : cylindres, cônes, etc... La figure (2.4) illustre cette représentation dans l'environnement du logiciel OLARGE-TMS.

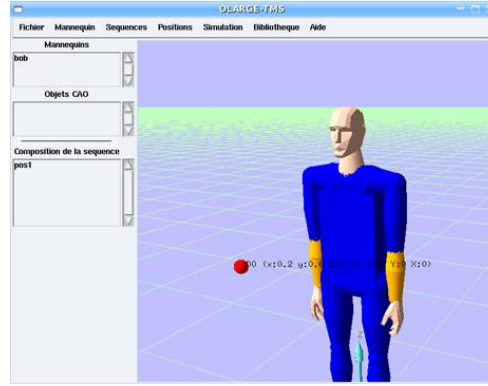


FIGURE 2.4 – Représentation virtuelle de l’enveloppe du mannequin.

Cette enveloppe charnelle nous permet de visualiser les mouvements générés afin de juger du réalisme du geste et permet également de réaliser un algorithme d’auto-collision que nous développons par la suite dans la partie 4.6.4.

2.3.1.2 Propriétés massiques

Les paramètres géométriques de l’humanoïde ne suffisent pas à caractériser les segments qui représentent les os d’un squelette. Chacun des corps est également caractérisé par ses propriétés massiques : la masse, et l’inertie qui indique la répartition de la masse dans chaque membre. La prise en compte de ces propriétés massiques peut notamment permettre d’induire des effets liés à la dynamique dans les schémas de génération de mouvements.

2.3.1.2.a Masse des corps

Nous nous basons sur l’étude [Army 88] pour affecter une masse et un centre de gravité à chacun des membres. Le schéma 2.5 montre la position des centres de gravité de chacun des corps tandis que la table 2.2 indique les masses de chacun d’entre eux.

Désignation	Masse (kg)
Tête	5,3
Buste	27,3
Bras droit	2
Bras gauche	2
Avant bras droit	1,4
Avant bras gauche	1,4
Main droite	0,5
Main gauche	0,5

TABLE 2.2 – Valeur massique de chaque corps.

Notons que les masses relevées dans ce tableau sont données pour une personne de 178,4cm de haut et pesant 81,5kg. Comme pour les longueurs segmentaires, nous nous intéressons dans ce cas à la masse relative entre chacun des corps. Ces masses sont donc conservées quelque soient la taille et la masse de l’individu pour lequel nous souhaitons prédire le mouvement.

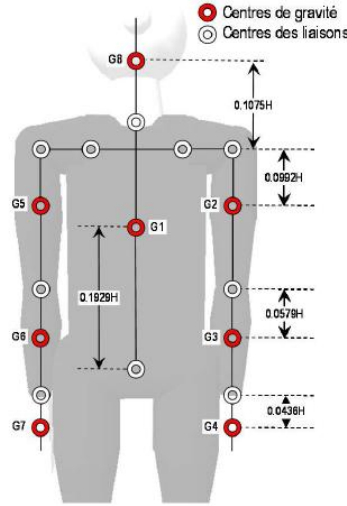


FIGURE 2.5 – Disposition des masses associées à chacun des corps en fonction de la hauteur du mannequin.

2.3.1.2.b Inertie des corps

L'inertie des corps nous est fournie par l'étude de Chandler et al [Chandler 75]. Nous obtenons pour chacun des corps les inerties suivant les différents axes des repères représentés sur les schémas de la figure 2.6. Les inerties sont données dans la table 2.3 et résultent d'une moyenne des valeurs obtenues sur un échantillon de 6 sujets d'anatomie.

Désignation	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
Tête	170,8	164,0	200,8
Buste	16193,7	10876,3	3785,1
Bras droit	133	132,7	22
Bras gauche	152,1	137,7	22,8
Avant bras droit	66,9	64,5	8,8
Avant bras gauche	64,7	63	8,6
Main droite	7,54	6,15	2,15
Main gauche	6,88	5,57	1,79

TABLE 2.3 – Inertie autour des axes x , y et z de chacun des corps ($\times 10^3$ g.cm²).

2.3.2 Modélisation cinématique

L'agencement des corps et des liaisons d'un système mécanique forme une ou plusieurs chaînes cinématiques. Les corps notés C_i sont ainsi reliés entre eux par les liaisons cinématiques idéales notées L_i . Un mannequin humanoïde peut être modélisé sous la forme de plusieurs chaînes de ce type.

Concernant les articulations, nous faisons l'hypothèse d'une articulation parfaite sans jeu ni frottement et composée à partir de liaisons rotoïdes (ou "pivot" selon la terminologie retenue). Ces liaisons possèdent un seul degré de liberté et nous supposons que nous pouvons piloter indépendamment chacune d'entre elles. La position angulaire d'une liaison i est représentée par le paramètre q_i .

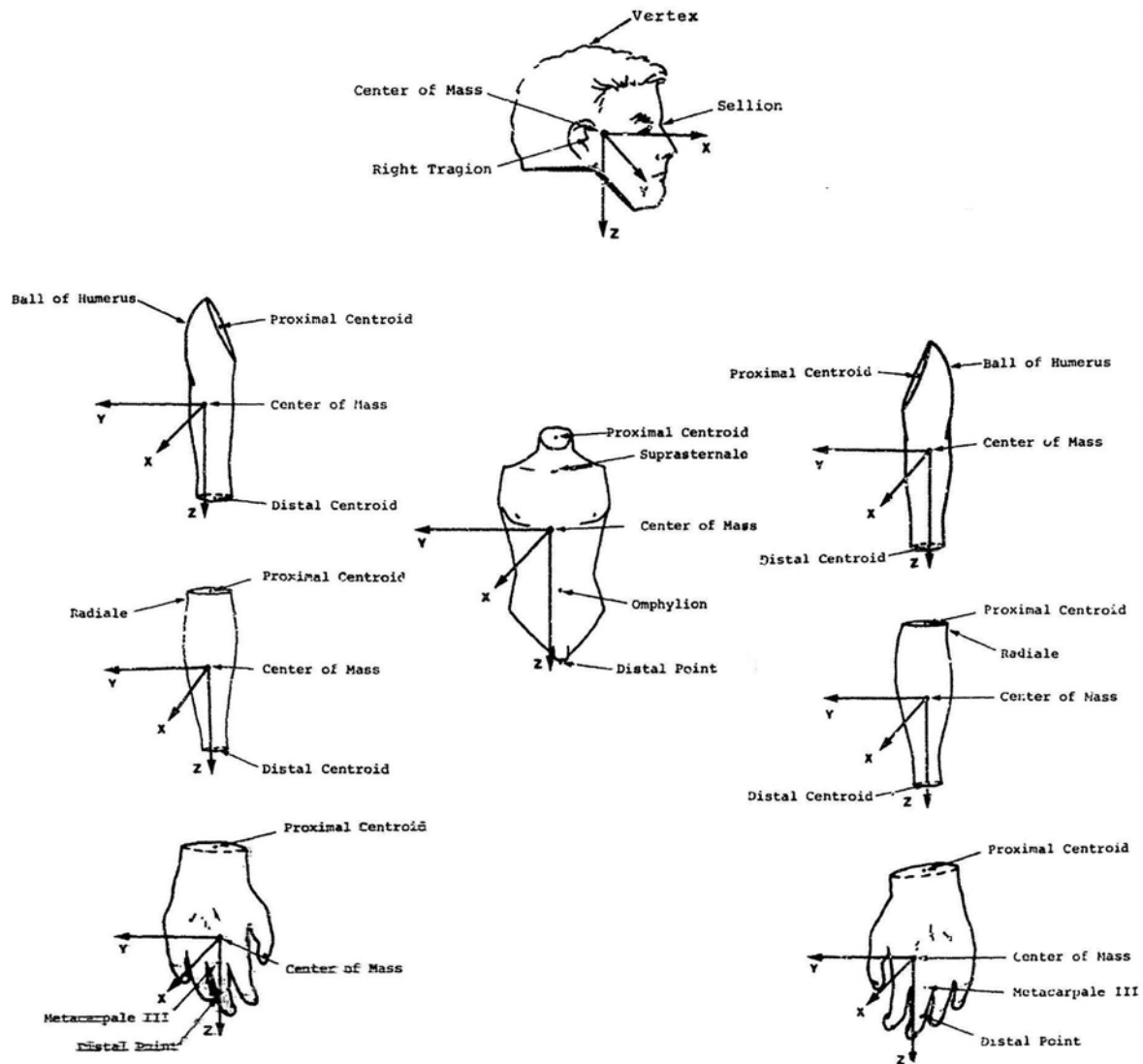


FIGURE 2.6 – Repère associé à chaque membre pour différencier les valeurs inertielles (issue de Chandler et al [Chandler 75]).

2.3.2.1 Modélisation des complexes articulés

Nous connaissons, par le biais des tables anthropométriques, le placement de chaque articulation de l'humain dans l'espace. Cependant, il nous faut encore reproduire la cinématique de chaque articulation grâce à l'assemblage de plusieurs liaisons pivots.

Nous décomposons notre mannequin en plusieurs parties et allons les analyser séparément. Nous allons faire la comparaison entre l'humain réel et sa représentation. Pour chacune des articulations reproduites, nous étudions également les limitations angulaires et rappelons la décomposition en zones du débattement articulaire utilisée en ergonomie. L'ensemble de ces informations est issu de divers ouvrages tels que [McAtamney 93, Aptel 00].

2.3.2.1.a Colonne vertébrale

La colonne vertébrale est un ensemble de vertèbres qui s'articulent entre elles et se modélisent généralement par des liaisons rotules [Kapandji 04, Kapandji 05]. Cependant, nous faisons l'hypothèse que nous n'avons pas besoin de toutes les vertèbres pour recréer un mouvement proche du mouvement humain. Il est courant en robotique humanoïde de modéliser la mobilité de la colonne vertébrale par un groupement de liaisons rotoïdes au niveau du bassin [Kaneko 04, Jung 10]. Ce choix est également le notre comme le montre la figure 2.7 qui représente le schéma cinématique de la colonne vertébrale. Ainsi, le buste est modélisé comme un solide unique et la ligne d'épaules peut être mise dans une situation semblable à celle d'un humain. A contrario, les déformations du haut du corps ne peuvent être décrites par ce modèle simple. Cette modélisation coïncide avec celle retenue en ergonomie pour définir les débattements angulaires maximum admissibles pour un humain qui sont présentés dans la table 2.4.

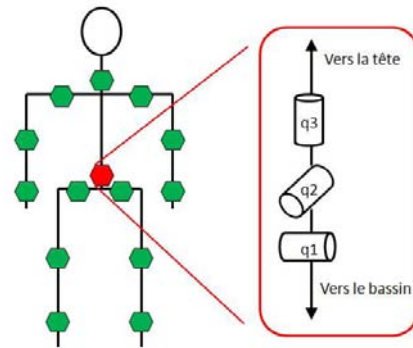


FIGURE 2.7 – Schéma cinématique de la colonne vertébrale.

Mouvement	Liaison	Limite inférieure	Limite supérieure
Flexion / Extension	q_1	-55	95
Flexion / Extension latérale	q_2	-35	35
Rotation droite / gauche	q_3	-40	40

TABLE 2.4 – Amplitude articulaire maximale pour la colonne vertébrale.

Le schéma (2.8) illustre la classification des postures par scores utilisée dans la technique RULA d'après l'étude ergonomique [McAtamney 93].

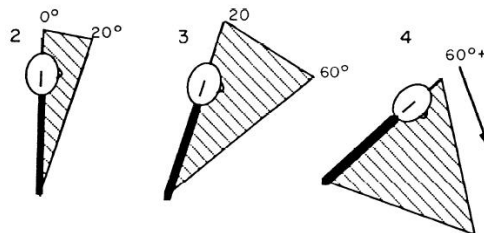


FIGURE 2.8 – Classification des scores utilisés dans la méthode RULA pour qualifier l'angulation du buste dans le plan sagittal. Plus le score est élevé, plus la posture est pénalisante d'un point de vue ergonomique [McAtamney 93]

2.3.2.1.b Cou

Le cou est le prolongement de la colonne vertébrale (vertèbres cervicales) et peut également se modéliser par une liaison rotule, soit un assemblage de trois liaisons pivots comme présenté sur le schéma 2.9. La table 2.5 nous montre les débattements angulaires maximum du cou. Tout comme pour la colonne vertébrale, nous pouvons également définir plusieurs zones de risque ergonomique selon [McAtamney 93]. Ces zones sont représentées par le schéma 2.10.

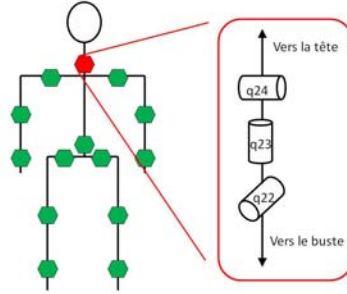


FIGURE 2.9 – Schéma cinématique représentant l'articulation du cou.

Mouvement	Liaison	Limite inférieure	Limite supérieure
Flexion / Extension	q_{24}	-45°	70°
Flexion / Extension latérale	q_{22}	-35°	35°
Rotation gauche / droite	q_{23}	-70°	70°

TABLE 2.5 – Limites angulaires du cou.

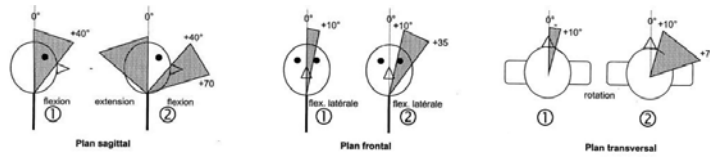


FIGURE 2.10 – Limites angulaires liées au cou issue de [McAtamney 93]. Selon la codification française OREGÉ [Aptel 00] et pour chaque mouvement, la figure de gauche représente la zone "acceptable" et la figure de droite représente la zone "non recommandée"

2.3.2.1.c Epaule

La modélisation de ce complexe articulé est formée de deux parties distinctes. Ainsi, la figure 2.11 simule le système scapulo-huméral (en rouge) et la rotule de l'épaule (en bleu). Les amplitudes articulaires liées à ces deux sous-systèmes sont données dans les tables 2.6 et 2.7.

2.3.2.1.d Coude

La cinématique du coude peut se traduire par une simple liaison pivot 2.12. Le schéma 2.13 et la table 2.8 nous renseignent sur les débattements maximum possibles.

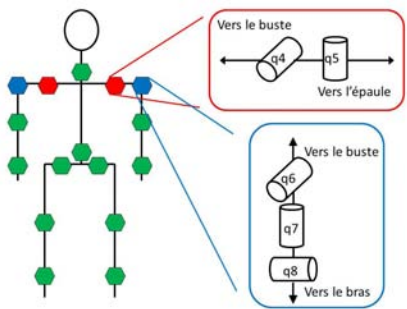


FIGURE 2.11 – Modélisation du système d'articulation de l'épaule.

Mouvement	Liaison gauche (droite)	Limite inférieure	Limite supérieure
Relèvement / Abaissement	$q_4(q_{13})$	-15°	45°
Antépulsion / Rétropulsion	$q_5(q_{14})$	-10°	25°

TABLE 2.6 – Limites articulaires de l'articulation scapulo-humérale.

Mouvement	Liaison gauche (droite)	Limite inférieure	Limite supérieure
Adduction / Abduction	$q_6(q_{15})$	-30°	180°
Rotation interne / externe	$q_7(q_{16})$	-180°	140°
Flexion / Extension	$q_8(q_{17})$	-180°	180°

TABLE 2.7 – Limites articulaires de la liaison rotule de l'épaule.

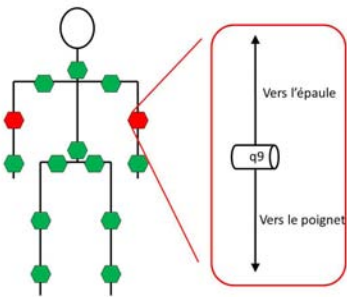


FIGURE 2.12 – Schéma cinématique du coude.

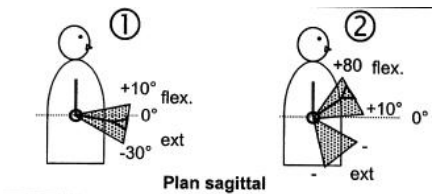


FIGURE 2.13 – Zone angulaire du coude. Selon la codification française OREGÉ [Aptel 00], la figure de gauche représente la zone "acceptable" et la figure de droite représente la zone "non recommandée".

Mouvement	Liaison gauche (droite)	Limite inférieure	Limite supérieure
Flexion / Extension	$q_9(q_{18})$	-90°	80°

TABLE 2.8 – Amplitude articulaire maximum du coude.

2.3.2.1.e Poignet

L'articulation du poignet permet de ne générer que deux rotations. Le mouvement de prono-supination du poignet est induit par le déplacement de deux os : le radius et le cubitus. Cependant, la communauté robotique simplifie généralement ce mouvement complexe par une seule liaison de type rotule située au niveau du poignet. Par conséquent, nous utilisons un assemblage de 3 liaisons pour la modéliser comme le montre la figure 2.14. La table 2.9 et la figure 2.15 décrivent les différentes zones angulaires définies par les ergonomes. Les limites d'amplitude articulaire du poignet sont données par Kapandji [Kapandji 04, Kapandji 05].

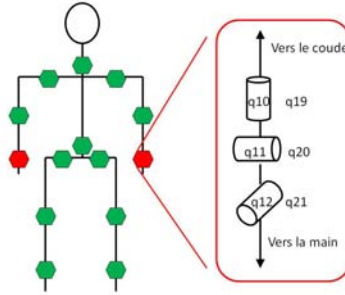


FIGURE 2.14 – Schéma cinématique lié au poignet du mannequin.

Mouvement	Liaison gauche (droite)	Limite inférieure	Limite supérieure
Pronation / Supination	$q_{10}(q_{19})$	-85°	90°
Flexion / Extension	$q_{11}(q_{20})$	-85°	85°
Flexion latérale	$q_{12}(q_{21})$	-15°	45°

TABLE 2.9 – Limites angulaires associées au poignet.

Remarque : La composition de l'ensemble des modélisations des sous-chaînes complexes articulées nous donne le schéma cinématique de la partie haute de l'humanoïde. Etant donné que nous nous focalisons sur des mouvements assis, nous ne détaillons pas le bas du corps qui est modélisé à partir des mêmes principes.

2.3.3 Paramétrage du mannequin

Le mannequin se compose de 38 liaisons rotoïdes actives dont 24 permettent d'animer le haut du corps et par conséquent de modéliser les mouvements réalisés en position assise. Le schéma cinématique global du mannequin peut se subdiviser en 5 sous-chaînes ouvertes qui vont chacune représenter les bras, les jambes et la tête.

Les chaînes cinématiques sont modélisées de manière systématique par le formalisme des paramètres de Denavit et Hartenberg [Denavit 55] (Une description technique est disponible dans l'annexe A). L'utilisation de ce formalisme permet de décrire le mouvement relatif d'un corps relié à un autre par une liaison

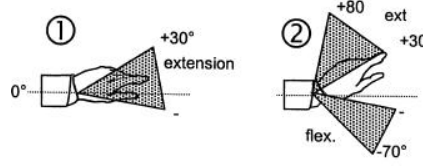


FIGURE 2.15 – Exemple de zone articulaire pour le poignet. Selon la codification française OREGÉ [Aptel 00], la figure de gauche représente la zone "acceptable" et la figure de droite représente la zone "non recommandée".

pivot en utilisant seulement 4 paramètres. Parmi ces 4 paramètres, 3 sont constants et imposés par la géométrie de la liaison et le paramètre variable de rotation est noté q_i . L'ensemble de ces paramètres variables définit entièrement le positionnement relatif des corps d'une même chaîne cinématique composée de liaisons pivots et constitue un système de coordonnées pour le repérage de celles-ci. Les q_i sont ainsi appelées *coordonnées généralisées* et le vecteur $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ formé de toutes ces coordonnées est appelée vecteur de *configuration* ou de *posture* pour une chaîne cinématique à n liaisons permettant chacune un degré de liberté. Nous utilisons alors les termes d'*espace articulaire*, d'*espace des configurations* ou d'*espace généralisé* pour décrire l'espace dans lequel est défini ce vecteur \mathbf{q} . La posture du haut du corps de notre mannequin est donc définie par un vecteur \mathbf{q} à 24 composantes.

Il est possible de définir une distance dans l'espace généralisé afin de comparer des postures. La solution la plus évidente consiste à doter la partie de cet espace de dimension n bornée par les butées articulaires de la norme euclidienne et d'assimiler localement cet espace à \mathbb{R}^n . Cette distance entre deux postures \mathbf{q}^0 et \mathbf{q}^1 peut ainsi être définie par :

$$d(\mathbf{q}^0, \mathbf{q}^1) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i^1 - q_i^0)^2} \quad (2.14)$$

Cette mesure considère de manière égale chacune des liaisons. Il est également possible de mettre en oeuvre des pondérations afin de prendre en compte indirectement les inerties vues par les liaisons ou de l'amplitude permise par les butées, par exemple. La définition d'une métrique Riemmanienne dépendant de la configuration courante peut s'écrire de manière générique :

$$d_w(\mathbf{q}^0, \mathbf{q}^1) = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i(\mathbf{q})(q_i^1 - q_i^0)^2} \quad (2.15)$$

où chacun des $w_i(\mathbf{q})$ est un facteur de pondération associé à la liaison d'indice i .

Dans le modèle retenu, toutes les chaînes partent d'un même point qui se situe à la base de la colonne vertébrale. La modélisation de Denavit-Hartenberg, la composition des différentes sous-chaînes et la répartition des liaisons dans celles-ci sont présentées en annexe A.

2.4 Relation entrées-sorties : le modèle cinématique direct

Nous considérons un modèle entrées-sorties cinématique. Celui-ci permet d'exprimer de manière exacte les vitesses opérationnelles en fonction des vitesses généralisées sous la forme :

$$\dot{\mathbf{X}} = J(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2.16)$$

et les incréments opérationnels en fonction d'incrément dans l'espace généralisé approximés au premier ordre par :

$$\delta \mathbf{X} = J(\mathbf{q})\delta \mathbf{q} \quad (2.17)$$

où $J(\mathbf{q})$ est une matrice $m \times n$. Cette relation est donc une application linéaire en chaque point de l'espace généralisé mais l'image d'un même vecteur $\dot{\mathbf{q}}$ (ou $\delta \mathbf{q}$) varie en fonction de la configuration courante \mathbf{q} .

2.4.1 Manipulabilité, conditionnement et singularités

Le modèle cinématique est une application linéaire qui transforme les vitesses généralisées en vitesses opérationnelles. Il transforme un convexe pris dans \mathbb{R}^n en un autre convexe dans un espace localement semblable à \mathbb{R}^m . Une représentation géométrique du problème pour $n = 3$ et $m = 2$ est donnée à la figure 2.16 : une boule unité ($\|\delta \mathbf{q}\|^2 \leq 1$) dans l'espace généralisé est transformée en une ellipsoïde dans l'espace opérationnel [Maciejewski 90, Bennis 02a].

Pour savoir quantitativement comment les “actionneurs” agissent sur la tâche, il faut pouvoir mesurer le ratio entre vitesse généralisée et vitesse opérationnelle. On sait, par exemple, que dans les configurations dites *singulières*, le rang de J diminue et certaines directions de l'espace opérationnel ne sont plus dans l'image de J . On ne peut donc plus produire d'incrément dans ces directions quelles que soient l'amplitude et la direction de l'incrément généralisé. En pratique, lorsque le déterminant de J prend une valeur très proche de zéro, on peut observer qu'il est nécessaire de produire un incrément de très grande amplitude dans l'espace généralisé pour produire un incrément de très faible amplitude dans certaines directions de l'espace opérationnel. Il y a donc des configurations pour lesquelles le rapport de l'incrément généralisé sur l'incrément opérationnel est très faible. De manière duale et pour une configuration donnée, différents $\delta \mathbf{q}$ de même module produiront des incréments opérationnels de modules différents. De manière générale, ce rapport et l'efficacité de la chaîne cinématique évoluent avec la configuration. Nous pouvons mesurer globalement cette efficacité ou bien la ramener à une consigne particulière. Dans tous les cas, la décomposition en valeurs singulières fournit les bases de cette mesure.

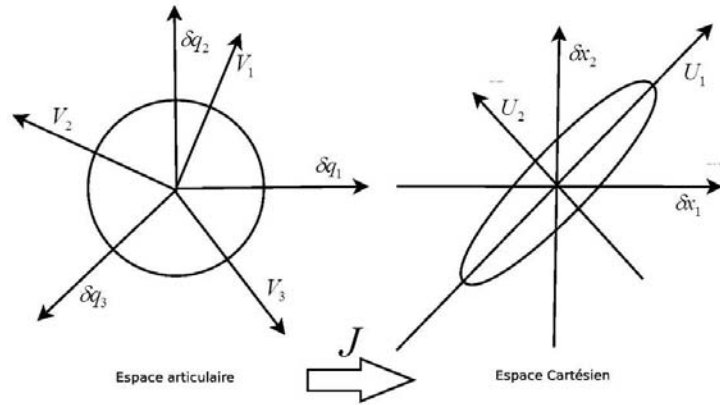


FIGURE 2.16 – Représentation géométrique de la relation entrée-sortie pour un système dans lequel $n = 3$ et $m = 2$.

2.4.2 Décomposition en valeurs singulières

La décomposition en valeurs singulières d'une matrice met en évidence une matrice diagonale qui lui est équivalente. Ainsi, pour notre matrice jacobienne J de dimension $(m \times n)$ il existe deux matrices orthogonales U de dimension $(m \times m)$ et V de dimension $(n \times n)$ [Golub 83, Rotella 95] telles que :

$$U^T J V = \Sigma$$

ou encore :

$$J = U \Sigma V^T \quad (2.18)$$

où :

- $U = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2 \quad \dots \quad \mathbf{U}_m]$ est une base orthonormale de l'espace opérationnel,
- $V = [\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \dots \quad \mathbf{V}_n]$ est une base orthonormale de l'espace généralisé,
- $\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p\}$ est de dimension $(m \times n)$, $p = \min\{m, n\}$ (p est le rang de J) et $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0$.

Les σ_i sont les valeurs singulières de J . La SVD permet de diagonaliser l'application par un changement de repère approprié à la fois dans l'espace généralisé et dans l'image de J .

Remarquons que la décomposition en valeurs singulières fournit une représentation explicite :

- de l'image de J : les $\{\mathbf{U}_i; i = 1, \dots, p \leq m\}$ forment une base de l'image de J ;
- du noyau de J : les $\{\mathbf{V}_i; i = p + 1, \dots, n\}$ forment une base du noyau de J .

A partir de 2.18, il est possible d'exprimer la décomposition en valeurs singulières de la matrice J de la manière suivante :

$$J = \sum_{i=1}^p \sigma_i \mathbf{U}_i \mathbf{V}_i^T$$

Soit encore, en notant $\delta \tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{V}_i^T \delta \mathbf{q}$ et $\delta \tilde{\mathbf{X}}_i = \mathbf{U}_i^T \delta \mathbf{X}$,

$$\sigma_i \delta \tilde{\mathbf{q}}_i = \delta \tilde{\mathbf{X}}_i \quad i = 1, \dots, p$$

où on note directement l'influence de la valeur des σ_i sur la capacité que possède le système à produire des incréments dans l'une des directions $\delta \tilde{\mathbf{X}}_i$ de l'espace image.

La signification géométrique de cette transformation est la suivante : la transformée par J d'une boule de rayon unité dans l'espace généralisé est un ellipsoïde de dimension p d'axes principaux \mathbf{U}_i , la longueur de l'axe selon \mathbf{U}_i valant σ_i . Le volume de cet ellipsoïde est donné par la formule 2.19 issue de [Nakamura 91].

$$\text{volume d'ellipsoïde} = \frac{\pi^{m/2}}{\Gamma(1 + m/2)} IM_1 \quad (2.19)$$

où Γ représente la fonction Gamma et où IM_1 est l'indice de manipulabilité qui est défini par :

$$IM_1 = \sqrt{\det(JJ^T)} = \sqrt{\det(\Sigma\Sigma^t)} = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_p$$

IM_1 est donc, à une constante multiplicative près, la mesure du volume de l'ellipsoïde dans l'espace opérationnel [Yoshikawa 84]. Cet indice de manipulabilité sera d'autant meilleur que les σ_i se rapprocheront de l'unité i.e. que l'ellipsoïde tendra vers une boule. Cet indice sera nul en configuration singulière i.e.

lorsque $p < m$. Une autre mesure globale de l'efficacité de la chaîne cinématique en une configuration donnée est fournie par le conditionnement κ de J [Salisbury 82]. Celui-ci est défini par :

$$\kappa = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} \geq 1$$

C'est donc le rapport entre le grand et le petit axe de l'ellipsoïde. Une chaîne cinématique permettra un déplacement de coût semblable dans toutes les directions si κ tend vers 1. *A contrario*, à proximité des valeurs singulières, on a $\sigma_{min} \simeq 0$, donc $\kappa_{sing} = \lim_{\sigma_{min} \rightarrow 0} \kappa = \infty$ ce qui traduit un ellipsoïde très aplati suivant \mathbf{U}_{min} et une direction $\delta\tilde{\mathbf{X}}_{min}$ difficilement accessible.

Un autre indice peut-être la mesure d'excentricité de l'ellipse [Bayle 01] donnée par la formule 2.20.

$$IM_2 = \sqrt{1 - \frac{\sigma_m^2}{\sigma_1^2}} \quad (2.20)$$

Ce critère est borné entre 0 et 1. La valeur 0 signifie qu'il n'existe pas de direction préférentielle pour le système tandis que si le critère vaut 1, cela signifie au contraire qu'il existe des directions préférentielles pour la manipulabilité du système.

Remarque : Étant donné que la matrice jacobienne est calculée numériquement, les valeurs obtenues sont approchées et l'obtention en pratique d'une valeur singulière exactement nulle est improbable. Pour la suite, nous considérons donc que la matrice jacobienne peut posséder des valeurs singulières très faibles mais qu'elle n'est jamais singulière (c'est pourquoi nous avons considéré que J est de rang plein et donc $p = m$).

2.4.3 Manipulabilité directionnelle

La notion de manipulabilité directionnelle est introduite par Zlajpah [Zlajpah 96] et reprise par Nait Chabane [Nait Chabane 06] et représente la manipulabilité d'un système suivant la tâche qu'il doit accomplir. L'équation de cette mesure est donnée par l'équation 2.21 :

$$IM_{dir} = \sum_{i=1}^m |(d^t \cdot \mathbf{U}_i) \sigma_i| \quad (2.21)$$

où $d = \frac{\dot{\tilde{\mathbf{X}}}}{\|\dot{\tilde{\mathbf{X}}}\|}$ est le vecteur unitaire représentant la direction de déplacement.

Prenons l'exemple d'un robot qui doit se déplacer suivant l'axe \vec{x} . Le robot, à l'état initial, est replié sur lui-même, la situation de l'organe terminal étant à la position (0,0) comme illustré sur la figure 2.17 a). Nous cherchons à atteindre le point (2,0). Pour ces deux positions de l'organe terminal, l'indice de manipulabilité est nul (et c'est le cas dès lors que le robot se trouve dans une posture singulière) comme l'illustre la figure 2.17 b). Pour ces mêmes positions, en regardant la mesure de manipulabilité directionnelle 2.17 c), nous observons en $x = 0$ (lorsque le bras du robot est replié sur lui-même) que la manipulabilité liée à la tâche est non nulle pour une direction donnée. La figure 2.17 c) illustre cette nouvelle mesure de manipulabilité et nous montre la mobilité du robot suivant la direction \vec{x} .

2.5 Modélisation du mouvement

Nous définissons dans cette partie le mouvement et ses composantes, mais également les outils d'analyse que nous avons mis en œuvre pour mesurer et comparer les mouvements humains.

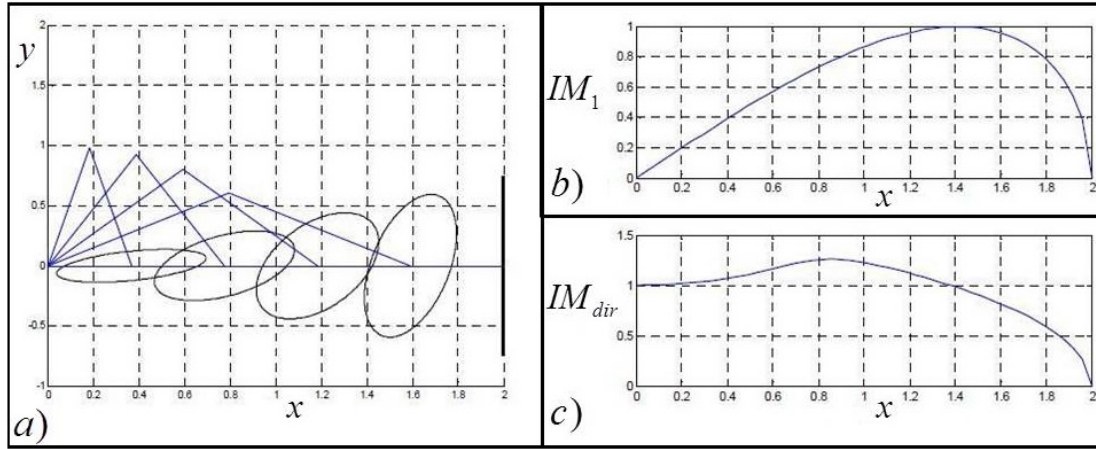


FIGURE 2.17 – Manipulabilité d'un bras manipulateur plan qui évolue suivant la posture du système.

2.5.1 Définition du problème

Le mouvement se définit comme la *variation de la position d'un point, de la situation d'un solide ou d'un système étudié dans un référentiel donné, en fonction du temps* [Le Lionnais 05]. Le mouvement d'un système paramétré par x qu'on notera de manière générale $x(t)$ peut être décomposé en une évolution spatiale $x(s)$ et un profil temporel $s(t)$. Nous appelons indifféremment *trajectoire* ou *chemin* cette évolution spatiale. Concernant le mouvement d'un humain, nous pouvons nous intéresser à l'évolution de la configuration de ses chaînes cinématiques; cette évolution $\mathbf{q}(t)$ est alors décrite dans l'espace généralisé. Nous pouvons aussi nous intéresser principalement à la réalisation de la tâche; le mouvement $\mathbf{X}(t)$ est alors décrit dans l'espace opérationnel. Nous mettons l'accent ici sur ce dernier point de vue et focalisons notre étude sur les mouvements de la main et des organes terminaux en général.

Pour permettre d'analyser les trajectoires obtenues dans différents contextes tels que la capture de mouvements ou la simulation automatique, il est nécessaire de comparer ces trajectoires sur une base numérique. Ceci impose de définir les notions de distance dans les différents espaces considérés.

2.5.2 Trajectoires et géodésiques

Le déplacement d'une situation initiale \mathbf{X}^0 vers une situation finale \mathbf{X}^f implique de générer un chemin dans l'espace noté $\mathbf{X}(s)$ où s est une variable indépendante qui représente sans perte de généralité la longueur (ou le ratio de la longueur totale, si ce paramètre est normé entre 0 et 1) du chemin parcouru. La génération d'un chemin peut être imposée par la tâche. Dans bien des cas, ce chemin est libre *a priori* et son obtention ou sa paramétrisation résulte de différentes méthodes, sur des fondements géométriques ou physiques : interpolation, cinématique du point, courbes de Bézier ou encore chemins les plus courts [Barr 92, Dam 98, Belta 02, Kremer 08]. Nous nous intéressons particulièrement à la façon de produire le chemin le plus court, appelé *géodésique*¹ [Trojanov 09], pour aller d'un point à un autre. La situation d'un corps se compose de paramètres qui interviennent dans des espaces différents, \mathbb{R}^3 pour les coordonnées de position, $SO(3)$ pour les paramètres d'orientation. Nous étudions maintenant les trajectoires dans ces deux espaces. Pour chacune de ces composantes, nous allons décrire les géodésiques et la façon de les produire ainsi que les outils de mesure de distance à la trajectoire que nous avons mis en place.

1. Orthodromie dans le cas particulier où la surface considérée est une sphère

2.5.2.1 Chemins dans l'espace Euclidien

2.5.2.1.a Géodésiques et distances en translation

Dans l'espace Euclidien, le chemin le plus court entre deux points est une ligne droite. Considérons les points P^0 et P^f comme le point initial et le point final de la trajectoire. Si nous notons $\|P^0 \vec{P}^f\|$ la distance entre ces points, celle-ci se calcule par la relation :

$$\|P^0 \vec{P}^f\| = \sqrt{(P^f - P^0)^2} = \sqrt{(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2 + (z_f - z_0)^2} \quad (2.22)$$

Tout point, noté P^i , sur la trajectoire géodésique est défini par la formule d'interpolation linéaire (2.23).

$$P^i = P^0 + \alpha(P^f - P^0) \quad (2.23)$$

dans lequel, α est un ratio compris entre 0 et 1 et représente le rapport $\|P^0 P^i\| / \|P^0 P^f\|$.

2.5.2.1.b Mesure de l'écart à la ligne droite

Pour la position, il existe des outils permettant de caractériser l'erreur entre une trajectoire quelconque et le chemin géodésique. Pour chacun des points de la trajectoire, nous pouvons réaliser un calcul vectoriel pour connaître la distance de chacun par rapport à la géodésique $x^*(s)$. La formule (2.24) nous fournit ce calcul où \vec{u} est le vecteur unitaire parallèle au chemin géodésique et \vec{P}^i correspond au vecteur reliant le point d'origine au point i . Le schéma 2.18 permet d'illustrer ces données. La récupération de la distance la plus grande nous fournit alors la mesure $D_{r_{max}}$.

$$D_{r_{max}} = \|\vec{P}^i \wedge \vec{u}\| \quad (2.24)$$

Revenons sur le processus qui permet de caractériser cette distance. Considérons que nous voulons pouvoir comparer la proximité relative de deux trajectoires, $y(s)$ et $y'(s)$ quelconques par rapport à une même ligne droite $x^*(s)$ dans \mathbb{R}^3 . Une première hypothèse simplificatrice dans nos cas d'études consiste à considérer que les extrémités des 3 trajectoires $y(s)$, $y'(s)$ et $x^*(s)$ sont confondues : la position initiale et la position finale sont communes.

Une mesure communément admise dans la littérature qui concerne l'analyse du mouvement humain consiste à mettre en œuvre les différentes étapes de raisonnement suivantes. On mesure la distance entre une ligne droite – la géodésique $x^*(s)$ – et une trajectoire quelconque $y(s)$ qui possède les mêmes extrémités. Pour chacun des points $y(k)$ de la trajectoire $y(s)$, on recherche la distance minimale à la géodésique $x^*(s)$. Les techniques de calcul des Variations [Gelfand 00] pour des problèmes aux extrémités libres indiquent que le chemin le plus court est la ligne droite perpendiculaire à la géodésique et que la distance est mesurée sur cette perpendiculaire.

$$d_1(x^*(s), y(k)) = \min_{x^*(j)} d(y(k), x^*(j)) \quad (2.25)$$

Pour mesurer la distance d'un point de la géodésique $x^*(s)$ à une trajectoire quelconque $y(s)$, on mesure donc la distance euclidienne le long de la géodésique perpendiculaire à $x^*(s)$ et coupant $y(s)$.

Ensuite, on définit la distance de la trajectoire $y(s)$ à la géodésique $x^*(s)$ comme étant le maximum mesuré sur la géodésique des distances $d_1(x^*, y(k))$.

$$D_{r_{max}} = d_2(x^*, y) = \max_{y(k)} d_1(x^*, y(k)) \quad (2.26)$$

Cette approche nous permet de comparer deux trajectoires par rapport à une même géodésique.

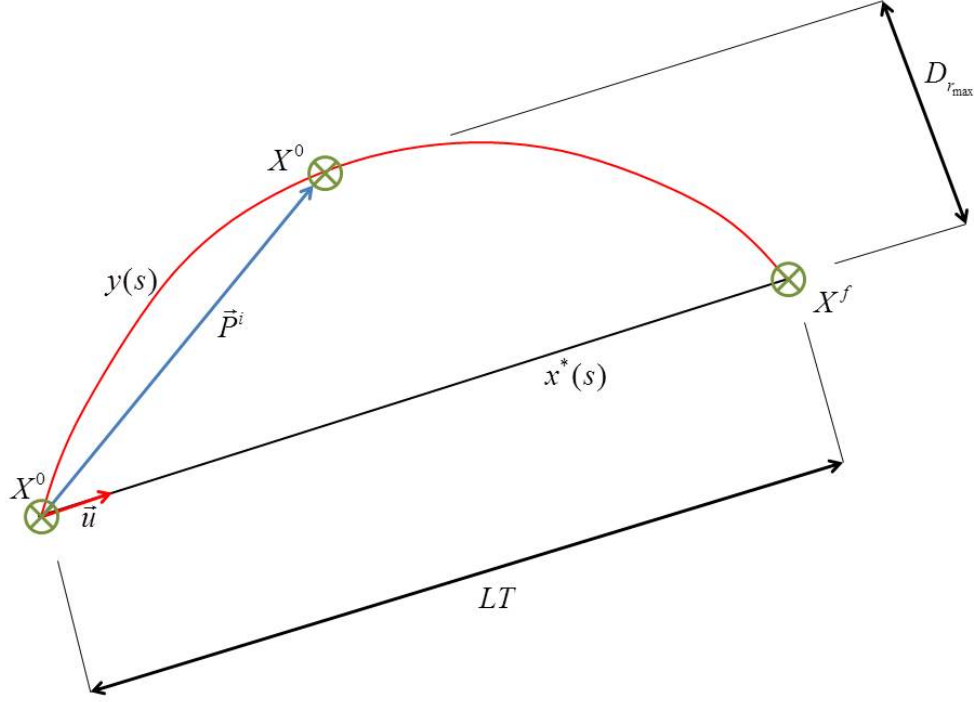
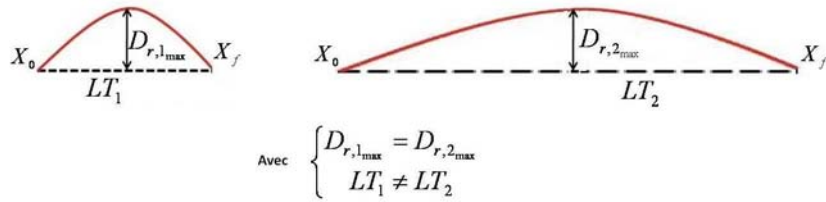


FIGURE 2.18 – Calcul de la distance entre la géodésique et une autre trajectoire.

2.5.2.1.c Index de linéarité

Lorsqu'il s'agit de disposer d'une mesure comparative pour différentes trajectoires de référence, il est également nécessaire de tenir compte de la longueur de chacune de ces trajectoires de référence. C'est la signification du LI ou *Linearity Index*, mesure communément utilisée par la communauté scientifique dans le domaine de l'analyse du mouvement ([Wang 99]), et dont l'objet est illustré par la figure (2.19) pour laquelle la distance d_2 (ou $D_{r_{max}}$) a la même valeur pour des chemins qui ont des longueurs différentes.

FIGURE 2.19 – Exemple de deux trajectoires ayant la même valeur de $D_{r_{max}}$

Le LI, basé sur le calcul du ratio de l'écart maximal par rapport à la longueur du chemin géodésique de référence, permet de normaliser la distance d_2 ($D_{r_{max}}$) entre une trajectoire et une géodésique. Cette normalisation est représentée par un pourcentage. L'équation (2.27) décrit le principe de calcul de cet indice.

$$LI = 100 \times \frac{D_{r_{max}}}{LT} \quad (2.27)$$

2.5.2.2 Une métrique pour mesurer les rotations

Afin de comparer deux rotations, il est nécessaire de mesurer la distance de l'une à l'autre. Différentes notions de distance dans les paramétrages retenus pour décrire les rotations ont été explorées. On lira avec intérêt les travaux de [Kuffner 04, Park 97, Huynh 09] dans ce domaine.

Le chemin le plus court entre deux rotations R^0 et R^f est obtenu en tournant autour d'un même axe de rotation : celui qui est fourni par la représentation (axe, angle) (de manière analogue à ce qui se passe sur la sphère S^2 en dimension 3 pour laquelle les géodésiques sont les grands cercles obtenus pour un axe de rotation constant).

L'article de Huynh [Huynh 09] rappelle que $SO(3)$ possède une structure qui lui confère une métrique Riemannienne naturelle qui permet de définir une distance le long des géodésiques de $SO(3)$. Cette distance est équivalente à la quantité θ obtenue en établissant la représentation (axe, angle) associée à la transformation de R^0 à R^f . Dans cette métrique, si deux rotations R^1 et R^2 possèdent la même valeur pour $\theta = \theta^1 = \theta^2$ et sont équidistantes vis à vis de la même référence R^0 , alors leurs axes de rotation $\vec{\eta}^1$ et $\vec{\eta}^2$ doivent dévier de la même valeur par rapport à l'axe de rotation de R^0 .

2.5.2.2.a Géodésiques et distances dans $SO(3)$

Dans l'espace des rotations, le chemin géodésique consiste à tourner autour d'un axe unique durant toute la rotation. La distance entre deux rotations est mesurée le long du chemin le plus court² qui les joint.

Cette distance peut donc être naturellement obtenue dans la représentation canonique comme la valeur de θ et est comprise entre 0 et π . Si la représentation choisie pour les rotations est la représentation par matrice 3×3 , on peut retenir de manière équivalente la 2-norme induite ou la norme de Frobenius (d_{Fro}) pour définir naturellement la notion de distance dans $SO(3)$. Celle-ci se calcule de la manière suivante [Park 97, Murray 94, Huynh 09] :

$$d(R^1, R^2) = \|\logm(R^1{}^t R^2)\| \quad (2.28)$$

où \logm est le logarithme matriciel qui s'écrit :

$$\logm(R) = \frac{\theta}{2 \sin \theta} (R - R^t) \quad (2.29)$$

$\|A\|$ peut-être choisi indifféremment :

- comme la 2-norme induite (ou norme euclidienne), dans ce cas $\|A\| = \|A\|_2 = \sigma_{\max}(A)$ où σ_{\max} est la plus grande valeur singulière de A . On montre que la 2-norme d'une matrice de rotation correspondant à une représentation $(\vec{\eta}, \theta)$ est égale à la distance géodésique entre les deux rotations i.e. est égale à θ . Elle fournit une mesure comprise dans l'intervalle $[0, \pi[$.
- ou bien comme la norme de Frobenius, souvent présente dans la littérature. Dans ce cas, $\|A\| = \|A\|_{\text{fro}} = \text{trace}(\sqrt{A^t A}) = \sqrt{(\sum_i \sigma_i^2)}$.

On montre que cette norme est égale à $\sqrt{2} \theta$. Elle fournit une mesure comprise dans l'intervalle $[0, \sqrt{2} \pi[$. Ces deux métriques sont donc équivalentes.

2. Comme pour la sphère, il existe une valeur de θ à partir de laquelle la trajectoire n'est plus la plus courte car on pourrait tourner dans l'autre sens à moindre coût.

2.5.2.2.b Evolution sur la géodésique

Nous pouvons parcourir le chemin géodésique en réalisant une interpolation linéaire sphérique entre deux orientations. Cette méthode d'interpolation, popularisée sous le nom de *slerp* par Shoemake [Shoemake 85], permet de parcourir la géodésique entre deux orientations en produisant des intervalles constants sur celle-ci. L'interpolation linéaire sphérique entre deux orientations est habituellement décrite dans une représentation utilisant les quaternions unitaires H^i et se réalise par la formule (2.30).

$$H^i = \frac{\sin((1-\alpha)\theta)}{\sin(\theta)} H^0 + \frac{\sin(\alpha\theta)}{\sin(\theta)} H^f \quad (2.30)$$

où α varie de manière monotone de 0 à 1 entre l'orientation initiale et finale et θ représente l'angle dans la représentation (vecteur, angle) entre l'orientation initiale et finale. A un incrément constant en α correspond un incrément de distance constant sur la géodésique.

Dans la représentation canonique, le *slerp* revient à définir une interpolation linéaire sur l'incrément de l'angle θ . Ainsi, la valeur courante Θ de l'angle varie entre 0 et θ suivant la formule :

$$\Theta(\alpha) = \alpha\theta \quad \text{pour } \alpha \in [0, 1] \quad (2.31)$$

2.5.2.2.c Mesure de l'écart à la géodésique en rotation

Il n'existe pas réellement de référence dans la littérature sur le mouvement humain qui concerne la déformation de la trajectoire dans $SO(3)$. Cependant, en nous inspirant du LI utilisé pour la translation, nous pouvons définir une mesure qui tienne compte à la fois de l'écart à la géodésique et de la longueur de la géodésique.

Nous définissons ici la même procédure que celle précédemment mise en œuvre dans \mathbb{R}^3 : la mesure d'une distance entre une trajectoire et une géodésique d'une part, puis la normalisation de cette mesure en fonction de la longueur de la géodésique de référence s'il s'agit d'étendre la comparaison à différentes trajectoires de référence.

Pour chacun des points $y(k)$ de la trajectoire $y(s)$, nous recherchons la distance minimale à la géodésique $x^*(s)$.

$$d_1(x^*, y(k)) = \min_{x^*(j)} d(y(k), x^*(j)) \quad (2.32)$$

Cette distance d_1 est mesurée suivant la ligne géodésique passant par $y(k)$ et coupant $x^*(s)$. Pour mesurer la distance d'un point de la géodésique $x^*(s)$ à une trajectoire quelconque $y(s)$, nous mesurons donc la distance euclidienne le long de la géodésique coupant $x^*(s)$ et coupant $y(s)$ en $y(k)$.

Ensuite, nous définissons la distance de la trajectoire $y(s)$ à la géodésique $x^*(s)$ comme étant le maximum mesuré sur chacune des géodésiques des distances $d_1(x^*, y(k))$.

$$D_{r_{max}} = d_2(x^*, y) = \max_{y(k)} d_1(x^*, y(k)) \quad (2.33)$$

Cette approche nous permet de comparer deux trajectoires par rapport à une même géodésique.

Ici, l'argument d'orthogonalité ne permet que de raisonner localement et nous avons adopté une méthode numérique de résolution. Pour chaque orientation intermédiaire $y(k)$, nous calculons itérativement la longueur des géodésiques joignant celle-ci à un échantillonnage de $x^*(s)$. Le point $p^i = x^*(i)$ fournissant la géodésique la plus courte est conservé. Parmi tous les couples $(y(i), p^i)$ ainsi obtenus, la distance la plus importante fournit l'écart maximal $D_{r_{max}}$ à la géodésique.

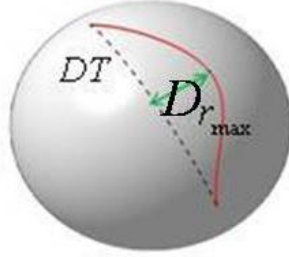


FIGURE 2.20 – Mesure de la déformation DI.

Ensuite, de la même façon que l'index de linéarité est utilisé par la communauté scientifique pour définir une déformation de trajectoire, nous ramenons notre écart maximal par rapport à la longueur du chemin géodésique. Ainsi, notre mesure de la déformation de la trajectoire en rotation se traduit par la relation suivante :

$$DI = 100 \times \frac{D_{r_{max}}}{DT} \quad (2.34)$$

où DT est la longueur de la géodésique qui joint l'orientation initiale R^0 à l'orientation finale R^f .

Remarques :

- Lorsque nous comparons deux chemins, il est possible de mettre en œuvre des distances qui tiennent compte de la valeur courante de ces chemins, comme nous venons de le faire pour $y(s)$ et $x^*(s)$. Il est également possible de considérer que la proximité entre deux fonctions dépend également de leur dynamique, donc des dérivées de ces fonctions. A des fins d'optimisation en dimension finie par exemple, nous considérons usuellement la distance :

$$d(x(s), y(s)) = \max_i \|x(i) - y(i)\| + \|\dot{x}(i) - \dot{y}(i)\| \quad (2.35)$$

La distance retenue ici ne constitue donc qu'une manière parmi d'autres de mesurer la proximité de deux courbes dans leur espace respectif.

- Nous avons volontairement mesuré une distance entre deux fonctions $x(s)$ et $y(s)$ où s est un paramètre indépendant qui n'est pas le temps.

La mise en œuvre d'une distance entre $x(t)$ et $y(t)$ donnerait des résultats différents. Dans la suite du mémoire, nous avons fait le choix de mesurer de manière séparée la distance entre les trajectoires dans \mathbb{R}^3 et $SO(3)$ d'une part, la distance entre les profils temporels unidimensionnels $s(t)$ d'autre part.

2.5.2.2.d Choix de représentation et visualisation des rotations

A l'inverse de la direction de déformation pour la translation, la déformation de trajectoire en rotation est très difficile à représenter en raison de la nature de $SO(3)$. La visualisation la plus intuitive de cette direction de déformation demeure l'affichage de boîtes orientées (2.21) [Park 97]. Différents auteurs ont proposé d'autres types de représentation [Choe 04, Hart 94, Buss 01] qui nous semblent moins convaincantes.

Ces boîtes orientées sont représentées sur deux lignes. La ligne du haut représente l'évolution réelle de l'orientation de l'objet. Nous notons ce chemin y^t . Seule une partie des points composant le chemin est représentée. Ils ont été choisis suivant un découpage temporel régulier. La ligne du bas représente l'objet qui aurait suivi le chemin géodésique (noté x^t). Les chemins (réel et géodésique) possèdent tout deux la

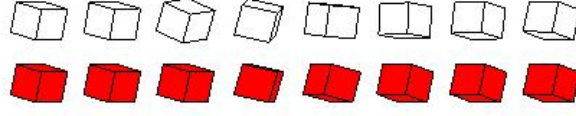


FIGURE 2.21 – Visualisation de la direction de déformation d'une trajectoire en rotation.

même orientation initiale ($x^0 = y^0$) et la même orientation finale ($x^f = y^f$). L'orientation x^i issue du chemin géodésique correspond à l'orientation la plus proche de l'orientation y^i réelle. Il devient possible de visualiser l'écart entre les boîtes y^i et x^i . Il est également possible de mesurer cet écart dans le but de montrer son évolution dans le temps.

Dans les chapitres suivants, nous utilisons à notre tour la représentation des boîtes orientées mais utilisons également d'autres représentations qui permettent de quantifier la valeur de la direction principale de déformation.

En particulier, nous avons également mis en œuvre une représentation plane, moins intuitive mais qui fournit un moyen alternatif d'évaluation de l'écart par rapport à une rotation de référence. Nous prenons l'exemple d'une trajectoire quelconque allant de R^0 à R^f . Entre ces deux orientations qui composent les conditions initiale et finale du mouvement se trouvent un certain nombre d'orientations intermédiaires appelées R^i . R_{\max} représente l'orientation qui est la plus éloignée du chemin géodésique. L'orientation la plus proche de R_{\max} sur le chemin géodésique est appelée R_{geo} . Le schéma 2.22 illustre cette première étape par analogie sur la sphère S^2 . Le chemin en noir représente le chemin géodésique entre R^0 et R^f et le chemin rouge représente l'évolution réelle de l'orientation. Le chemin vert représente le chemin géodésique entre l'orientation R_{geo} et R_{\max} . Ce chemin est donc caractérisé par un axe de rotation constant $\vec{\omega}$ et une amplitude γ qui permet de relier R_{geo} et R_{\max} alors que le chemin géodésique qui relie R^0 à R^f est caractérisé par les coordonnées canoniques $(\vec{\eta}, \theta)$. Le vecteur $\vec{\omega}$ se projette intégralement dans le plan perpendiculaire à $\vec{\eta}$: on peut donc quantifier la direction d'écart à la géodésique au point où la distance entre les deux courbes est mesurée par cette projection. Le vecteur $\vec{\omega}$ est distingué dans les 4 quadrants car γ est choisi positif par convention.

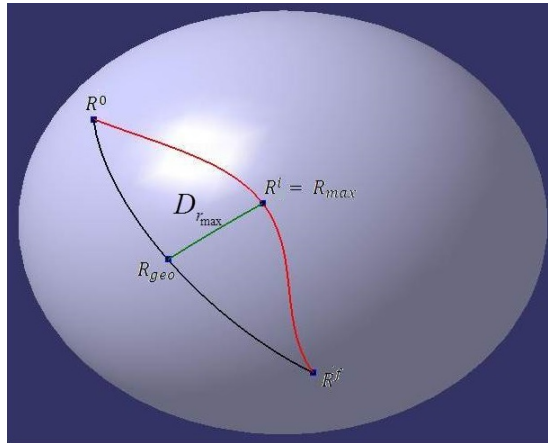


FIGURE 2.22 – Schéma récapitulant le dispositif de mesure de direction de déformation dans l'espace des rotations.

Le graphique 2.23 donné en exemple illustre la situation pour laquelle $\vec{\eta} = \vec{z}$ et fournit la projection de cet axe de rotation dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) . Il correspond à une partie importante de notre contexte expérimental pour lequel les mouvements d'atteinte produisent des déplacements dans le plan horizontal et des rotations d'axe vertical.

En pratique, si l'orientation finale acquise ne peut être réduite à une rotation simple d'axe vertical, alors la projection dans le plan perpendiculaire à \vec{z} possède une norme strictement inférieure à 1, comme l'illustre la figure 2.24. En effet, nous verrons au cours de nos expérimentations que l'axe de rotation entre deux orientations (initiale et finale) n'est pas toujours vertical. Une projection de cet axe qui possède une norme inférieure à 1 peut donc nous informer sur le mouvement global de rotation.

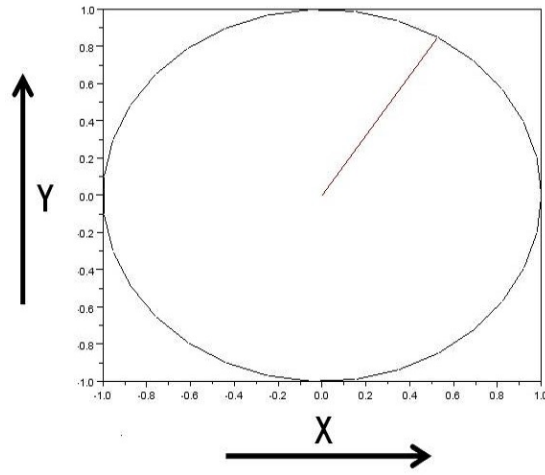


FIGURE 2.23 – Exemple de direction de déformation.

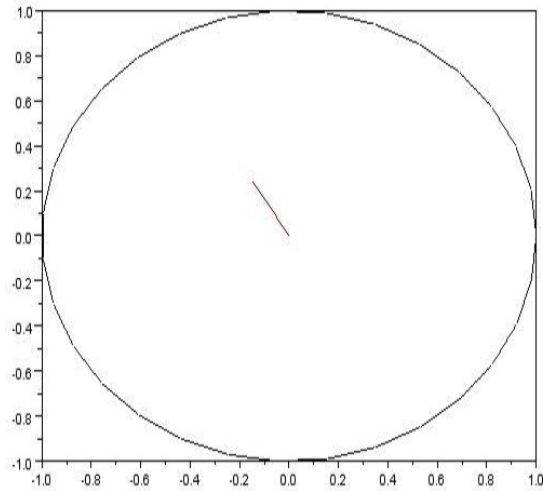


FIGURE 2.24 – Exemple de direction de déformation pour lequel la projection suivant le plan (x, y) produit un segment de norme nettement inférieure à 1.

2.5.3 Profil temporel

Le mouvement $\mathbf{X}(t)$ exprime l'évolution en fonction du temps. Lorsque nous nous intéressons à l'évolution en fonction du temps sur une trajectoire connue, celle-ci peut s'écrire comme la composition d'une loi d'évolution spatiale $\mathbf{X}(s)$ en fonction d'une variable indépendante qui n'est pas le temps, l'abscisse curviligne par exemple, et de la variation de cette variable en fonction du temps $s(t)$. On écrit alors $\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(s) \circ s(t) = \mathbf{X}(s(t))$ où $s(t)$ est le profil temporel.

Ainsi, la trajectoire spatiale et le profil temporel peuvent être paramétrés de manière indépendante comme l'illustre le schéma 2.25 où l'ordonnée \dot{s} représente la superposition d'un profil temporel sur une trajectoire spatiale.

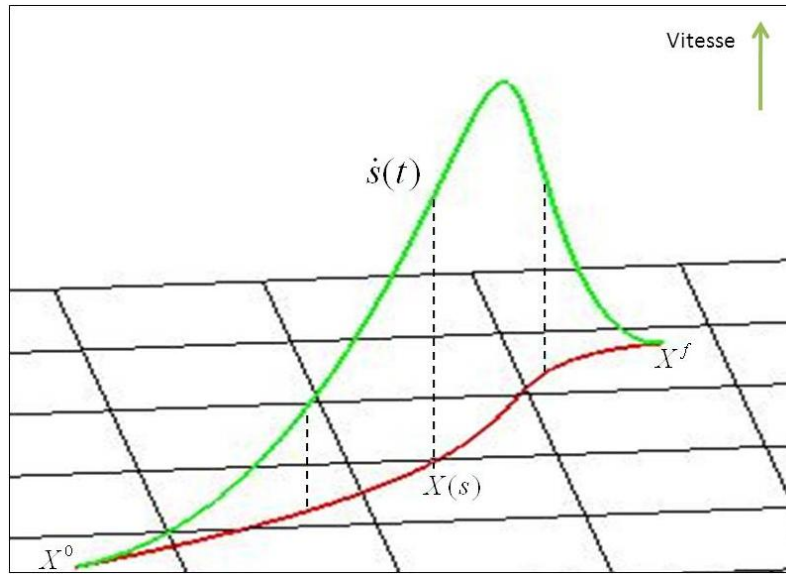


FIGURE 2.25 – Superposition du profil temporel (vert) sur la trajectoire spatiale (rouge).

Lors de la création d'un profil temporel, les propriétés de différentiabilité de $s(t)$ sont étroitement liées aux hypothèses concernant la dynamique des systèmes considérés. Prenons l'exemple d'un système à commander simplement décrit par les équations de Lagrange en mécanique qui relient l'évolution des variables de configuration aux efforts extérieurs appliqués au système par une équation différentielle vectorielle d'ordre 2. Les variables de configuration sont alors par définition continues et à dérivée continue par rapport au temps. Mais, nous pouvons faire l'hypothèse que les efforts extérieurs appliqués au système peuvent être discontinus. Il en est de même de l'accélération de chacune des variables de configuration. Dans ce cas, $s(t)$ est continue, à dérivée continue mais à dérivée seconde discontinue : cette fonction est donc \mathcal{C}^1 mais pas \mathcal{C}^2 . Supposons maintenant que ce système soit couplé, en série, à un autre système, d'actionnement ou de mesure. Prenons pour simplifier un dispositif d'actionnement en amont du dispositif mécanique ci-dessus. Dans ce cas, la grandeur d'entrée du système mécanique résulte de la dynamique de l'actionneur, obéit à une équation différentielle et par conséquent ne peut pas être discontinue. Dans ce cas, la variable de sortie est une fonction du temps de classe \mathcal{C}^2 au minimum. Pour piloter le modèle de ce système composé, il est donc légitime de mettre en œuvre des lois $s(t)$ de cette classe, aussi appelées abusivement lois *lisses*. Concernant le mouvement d'un système polyarticulé actionné, il est donc légitime de s'orienter vers ce type de lois et nous verrons que l'acquisition de mouvements humains s'approche de certaines lois appartenant à cette classe.

2.5.3.1 Contraintes, optimisation et lois de temps

Une méthode d'obtention d'un profil temporel ou d'un mouvement consiste à minimiser un critère, généralement de temps ou d'énergie, qui concerne l'horizon de temps considéré et qui, par conséquent, prend la forme d'un critère intégral. Cette idée est illustrée d'abord dans le cas mono-dimensionnel puis pour l'évolution de la position d'un point dans \mathbb{R}^3 .

Supposons dans un premier temps, que pour un système qui obéit à la mécanique classique décrit par $F = m\ddot{x}$, on souhaite minimiser le temps de parcours d'un point initial $x^0 = x(0)$ à un point final $x^f = x(t^f)$, tous deux étant des points de repos caractérisés par $\dot{x}(0) = \dot{x}(t^f) = 0$ sous la contrainte raisonnable que l'effort extérieur F est borné et obéit à $-F_{max} \leq F \leq F_{max}$. En utilisant les outils de la commande optimale [Pontriaguine 74], nous obtenons l'expression de la solution optimale, dite loi "bang bang", qui consiste à saturer alternativement la variable de commande – l'effort extérieur, dans ce cas – sur son niveau minimum et maximum.

Si maintenant, nous rajoutons à ce système une contrainte sur la vitesse maximale de la forme $-V_{max} \leq \dot{x} \leq V_{max}$, nous obtenons alors une loi temporelle dite trapézoïdale (en vitesse), qui sature alternativement les bornes de la commande et, selon les valeurs prises par A_{max} , V_{max} et $x^f - x^0$, peut saturer la contrainte de vitesse $\dot{x} = \pm V_{max}$ (cf. 2.26 [Fisher 88]).

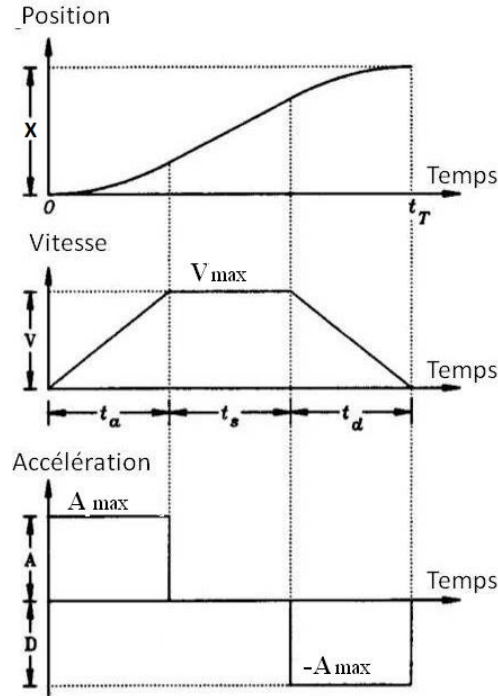


FIGURE 2.26 – Evolution de la position, vitesse et accélération d'une loi temporelle trapézoïdale.

Ces lois temporelles sont caractérisées par une accélération discontinue et présentant de fortes variations d'amplitude. Ici, $x(t)$ est de classe C^1 .

Pour produire des profils temporels plus lisses à partir de principes d'optimisation, il faut considérer que la commande, supposée discontinue, correspond à une dérivée d'ordre plus élevé de $x(t)$ et/ou que l'on cherche à lisser ses variations.

Considérons que nous cherchons à déplacer un point dans \mathbb{R}^3 sans contraintes cinématiques en tentant de fournir un profil qui minimiserait l'intégrale de la norme de la dérivée de l'accélération. C'est le problème

dit de la minimisation du *jerk* dans l'espace cartésien. L'outil théorique adapté est le Calcul des Variations ou la théorie de la commande optimale. Le problème d'optimisation s'écrit :

$$\min \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^3 u_i^2 dt \quad (2.36)$$

sous les contraintes :

$$\dot{x}_{1i} = x_{2i}; \dot{x}_{2i} = x_{3i}; \dot{x}_{3i} = u_i \text{ et } x_{3i}(0) = x_{3i}(t_f) = x_{2i}(0) = x_{2i}(t_f) = 0 \quad (2.37)$$

où t_f désigne la durée du mouvement et u_i est indifféremment la dérivée troisième de l'une ou l'autre des coordonnées de position $x_{11} = x; x_{12} = y; x_{13} = z$ pour la solution à jerk cartésien minimum qui s'écrit aussi :

$$\min \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left\{ \left(\frac{d^3 x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3 y}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3 z}{dt^3} \right)^2 \right\} dt \quad (2.38)$$

Le minimum est atteint pour une trajectoire droite dans l'espace considéré et pour un mouvement sur cette trajectoire $s(t)$ qui est de la forme :

$$s(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_0, \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (2.39)$$

où l'on observe que le choix de la variable de commande et du critère ont permis d'obtenir une loi lisse. Le schéma 2.27 nous donne l'évolution de la position, de la vitesse, de l'accélération et du jerk de ce profil temporel.

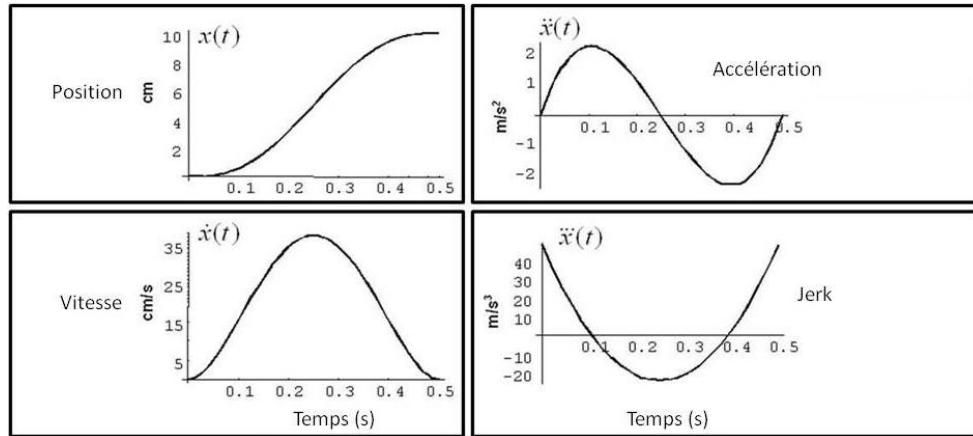


FIGURE 2.27 – Evolution de la position, vitesse, accélération et jerk d'un profil temporel de type minimum jerk.

Normalisation de l'espace et du temps : Il est souvent utile de normaliser les quantités manipulées. C'est notamment le cas dans ce mémoire où le paramètre d'évolution spatiale sur la trajectoire s est normalisé dans l'intervalle $[0, 1]$, sauf mention contraire explicite, et les stratégies d'interpolation sont menées dans ce cadre. Nous normalisons également notre profil temporel de 0 à 1 concernant la position du système sur le chemin géodésique en fonction du temps. Cette mise à l'échelle, spatiale et temporelle, va nous permettre de mieux comparer les profils temporels obtenus en acquisition et simulation avec des profils connus.

2.5.4 Synthèse

Nous avons établi la façon dont nous paramétrons le mouvement. Nous avons successivement décrit la composante spatiale et la composante temporelle. Dans la partie traitant de la trajectoire spatiale, nous avons réalisé un découpage suivant les espaces mis en jeu (\mathbb{R}^3 et $SO(3)$). Dans les deux cas, nous avons défini les chemins géodésiques, l'interpolation sur ces chemins et les différentes notions de distances entre trajectoires. Concernant l'aspect temporel, nous avons décrit les principes qui gouvernent le paramétrage des profils temporels et le lien avec les principes d'optimisation a été illustré, notamment dans le cas des trajectoires à minimum jerk.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis d'expliquer les choix de modélisation du problème. Nous avons dans un premier temps modélisé la tâche. Nous modélisons les gestes d'atteinte de l'opérateur par la donnée de la situation initiale et finale de la main. Aussi, nous utilisons les outils pour décrire la situation d'un solide dans l'espace, tant en position qu'en orientation. Nous avons également constaté qu'il existe bon nombre de représentations pour décrire l'orientation d'un solide par un jeu de 3 paramètres ou plus.

Dans un second temps, nous avons décrit l'humanoïde que nous souhaitons utiliser. Nous avons proposé une modélisation sous système robotique de l'opérateur, la disposition des articulations de notre modèle étant en accord avec les mouvements produits par l'homme. A partir des tables anthropométriques, nous avons choisi des longueurs segmentaires dépendantes de la hauteur du mannequin. Les masses et inerties de chacun des corps ont été attribuées de façon unique pour le mannequin, quelque soit sa hauteur. Les propriétés dimensionnelles, massiques et inertielles permettent d'obtenir un mannequin représentant un être humain moyen. Nous nous intéressons surtout aux longueurs, masses et inerties relatives entre chacun des corps.

L'espace de la tâche et l'espace articulaire étant différent, nous avons dans un troisième temps décrit la relation qui existe entre ces deux espaces. Nous avons notamment mis l'accent sur le fait que la relation n'est pas univoque. Le mannequin, en fonction de sa posture, possède donc des capacités de déplacements de la main qui ne sont pas égales suivant toutes les directions. Nous avons vu que nous pouvons nous baser sur la décomposition en valeurs singulières pour avoir une mesure de la capacité de déplacement de la chaîne et qu'il existe des mesures globales de la manipulabilité.

Enfin, nous nous sommes attachés à décrire le mouvement. Nous proposons un découpage qui sépare les aspects spatial et temporel. Sur le plan spatial, nous avons étudié les chemins géodésiques qui sont par la suite, nos chemins de référence pour paramétrer une trajectoire. Nous avons vu comment parcourir de tels chemins dans \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Nous avons également mis en place des outils pour mesurer les trajectoires dans chacun des deux espaces. Sur le plan temporel, nous savons qu'il existe plusieurs lois de temps et choisissons pour notre étude, de nous baser sur le "minimum jerk", une loi de temps lisse. Des outils de comparaison ont également été mis en œuvre afin d'étudier cette composante du mouvement.

Chapitre 3

Expérimentations

Afin de générer de façon automatique des mouvements d'atteinte effectués par un opérateur sur poste de travail, nous nous intéressons à la mise en évidence de propriétés concernant le mouvement :

- la géométrie dans l'espace de la tâche (forme des trajectoires, placement de la main, ...),
- les aspects temporels (courbes d'évolution des vitesses, simultanéité des mouvements en translation et rotation, ...),
- les coordinations articulaires et les trajectoires dans l'espace articulaire.

Dans la première partie de ce chapitre, les principaux résultats issus de la littérature sur l'analyse du mouvement humain sont résumés. On constate alors que, si l'étude des mouvements d'atteinte en position est courante, peu de travaux ont été effectués sur l'étude des chemins et déplacements dans l'espace de la tâche lorsque la position et l'orientation de la main (ou organe terminal) sont imposées. Nous avons donc réalisé des expérimentations afin de :

- reproduire les résultats de la littérature pour le cas de la position,
- étudier le cas de mouvements avec contrainte en orientation,
- analyser des mouvements avec contraintes couplées en position et orientation.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la définition du cadre expérimental mis en œuvre. Puis, les résultats obtenus sont décrits et des conclusions sur l'analyse des résultats sont proposées pour les cas de mouvements contraints :

- en position seulement,
- en rotation,
- en position et rotation.

3.1 Données bibliographiques sur le mouvement d'atteinte

Les études réalisées sur le mouvement d'atteinte sont basées sur des expérimentations proposées à divers sujets et pour lesquelles les mesures réalisées sont interprétées. La grande majorité des résultats de ces études ne s'intéressent qu'à la position de la main ; seules quelques études spécifiques s'intéressent à sa position et à son orientation. Afin de synthétiser les données issues de la littérature, nous allons dans un premier temps nous focaliser sur les trajectoires spatiales de la main. Dans un second temps, nous résumons les données concernant le profil temporel de la main. Bien que nous souhaitions travailler sur des tâches d'atteinte, des tâches telles que le pointage ou la prise de pièce sont également étudiées afin d'en extraire des informations. La synthèse de ces données nous permet par la suite de définir une loi de comportement de la main dans l'espace de la tâche spécifique à notre cas. Nous commençons par étudier le mouvement de translation de la main dans le plan horizontal.

Morasso [Morasso 81] et Desmurget *et al* [Desmurget 98] ont constaté que la main se déplace le long

des géodésiques lors de mouvement d'atteinte. Ainsi, afin d'analyser la trajectoire de la main dans l'espace cartésien, il est possible d'utiliser comme référence les chemins les plus courts. La trajectoire effectuée par la main est en partie liée au lieu où elle se situe. En effet, plusieurs auteurs ont mis en évidence deux zones préférentielles dans le volume atteignable par la main, dans lesquelles le comportement de la personne est différent. Pour des mouvements de translation dans le plan horizontal (plan de travail) avec la main près du buste (mouvement exécutés près du centre de l'espace de travail), la trajectoire de la main tend à être une ligne droite [Flash 85, Morasso 81, Desmurget 97, Flanagan 93]. Dans les mouvements de translation et lorsque la main s'éloigne du buste, la trajectoire de la main est courbe ([Engelbrecht 01, Papaxanthis 03]). Ce dernier constat est tout aussi vrai pour les mouvements horizontaux que verticaux. On trouvera une discussion plus générale sur l'utilisation des principes d'optimalité dans [Guigon 09].

Nous pouvons également nous intéresser à l'orientation de la main, lorsque celle-ci n'est pas contrainte de manière explicite. Certaines études [Roby-Brami 00, Bennis 02b] ont montré que cette orientation dépend de deux facteurs : la direction de déplacement de la main d'une part et la proximité de la configuration du bras avec une posture confortable d'autre part [Rossetti 94]. La direction de déplacement de main, quant à elle, est liée à la posture initiale.

L'orientation de la main, si elle n'est pas explicitement imposée, peut l'être via la position de l'objet à atteindre que ce soit pour des tâches d'atteinte [Lacquaniti 82] ou de prise [Wang 99]. Dans ce cas, si la cible reste fixe durant le mouvement, son orientation n'influe pas sur la trajectoire de la main dans \mathbb{R}^3 . Ce constat n'est plus valable si la cible devient mobile. En effet, dans des mouvements de pointage avec cibles mobiles, Brenner *et al* [Brenner 09] ont montré que l'orientation des cibles affecte la trajectoire de la main dans \mathbb{R}^3 . Dans le cadre de cibles fixes, nous pouvons envisager que la position et l'orientation peuvent être contrôlées séparément [Lacquaniti 82, Wang 99]. Par conséquent, il est possible de découper le problème en deux espaces distincts \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Nous utilisons ce constat en basant nos outils sur cette distinction et cette indépendance des espaces. Plusieurs auteurs vont plus loin dans cette décomposition du mouvement puisque le mouvement d'atteinte peut se séparer en une première phase de transport de la main et une seconde phase de positionnement précise. La phase de transport est essentiellement générée par le mouvement de l'épaule et du coude, celle de positionnement précis utilise le poignet [Kaminski 86, Soechting 81, Wang 99]. Ce type de séparation se retrouve également dans les méthodes de codification de geste telles que le MTM [MTM 96] où un temps est assigné au transport de la main et au autre au type de la prise.

Afin de mieux caractériser les mouvements lorsqu'une contrainte d'orientation est imposée, nous étudions les mouvements de prise d'objet même si notre cadre d'expérimentation reste celui des mouvements d'atteinte. En effet, des expériences réalisées pour comprendre le mouvement de prise d'objet telles que celles effectuées dans [Fan 06, Hesse 09, Bennis 02b] nous apportent des informations sur le mouvement d'atteinte puisque la prise de pièce se déroule en plusieurs phases dont une phase d'atteinte (aussi appelé phase de transport). Par ailleurs, en cas de port de charge, le mouvement n'est pas influencé par celle-ci tant qu'elle reste légère [Atkeson 85].

Les travaux de Bennis et Roby-Brami [Bennis 02b] et de Desmurget *et al.* [Desmurget 97], ont mis en évidence le fait que la commande d'orientation de la main est liée à la phase d'atteinte, soit la première phase. Ces auteurs concluent donc sur le fait que l'orientation de la main se réalise sur la première phase tandis que le déplacement de la main en position se réalise sur les deux phases : transport et ajustement. L'orientation aurait donc tendance à finir plus vite que la position et commencerait dès le début du geste. En effet, l'orientation de la cible est un paramètre pris en compte dans la planification du mouvement par le système nerveux central, ainsi la main débute sa rotation vers la situation à atteindre dès le début de la phase d'atteinte [Fan 06]. Des synchronisations entre les aspects de translation et de rotation ont également été observées dans le cas de tâche de prise de pièces [Cuijpers 04, Torres 04].

Ces conclusions concernent la synchronisation entre la position et l'orientation de la main.

Pour en revenir à la trajectoire spatiale, les études de [Fan 06, Hesse 09, Bennis 02b] montrent que l'orientation de départ de la main a une influence sur la façon dont le mouvement d'atteinte est réalisé dans l'espace articulaire. Dans le cas où la prise ne nécessite pas une orientation précise de la main, sa posture finale est liée à sa posture initiale. L'orientation finale de l'objet à prendre modifie la trajectoire de la main en raison d'une posture finale différente [Desmurget 97]. La trajectoire du poignet est davantage courbée et la posture finale du bras est modifiée. Les postures initiales et finales, dues à des orientations initiales et finales différentes de la main, influent donc grandement sur la trajectoire spatiale de la main, la rendant ainsi plus courbée. De plus, pour une situation donnée de l'objet à atteindre, la posture finale du bras reste identique [Grea 00]. Ainsi, les postures finales adoptées par des sujets devant réaliser des tâches contraintes telles que position et orientation de la main imposées sont très proches.

Nous abordons maintenant le profil temporel qui constitue la seconde composante du mouvement. Tout d'abord, certains auteurs et notamment Soechting *et al* [Soechting 81] ont montré que la vitesse d'exécution du mouvement n'a pas d'influence sur la trajectoire spatiale de la main. Notons également que l'ajout d'une contrainte explicite d'orientation de la main n'augmente pas la durée du mouvement d'après Fan *et al* [Fan 06]. Ainsi, nous séparons les aspects spatiaux et temporels dans nos algorithmes pour la génération de mouvement automatique. Concernant la durée du mouvement, il existe des outils et notamment le MTM [MTM 96] qui permettent de prédire le temps opératoire en entreprise pour des gestes répétitifs. Cependant, cette durée peut varier en particulier si aucun impératif de production n'est demandé à l'opérateur.

Concernant le profil temporel à proprement parlé, celui-ci semble invariant et présente une phase d'accélération puis une phase de décélération. Il se présente sous la forme d'une cloche approximativement symétrique et correspond à la solution du "minimum jerk" [Morasso 81, Atkeson 85, Flash 85, Hue 08, Flanagan 93]. L'étude de Svinin *et al* [Svinin 05] conclut sur une loi temporelle légèrement plus complexe appelée "Minimum driving force change" mais qui présente également une évolution de la vitesse tangentielle de la main en forme de cloche. Concernant le profil temporel en rotation, l'étude de Wang [Wang 99] indique que ce profil n'est pas tout à fait symétrique puisque plus l'orientation de la cible est éloignée de l'orientation initiale de la main, plus la phase de décélération est longue. Le profil temporel de la main suit cependant une loi douce dans l'espace de la tâche.

La recherche de caractéristiques reproductibles pour générer de façon automatique des mouvements d'atteinte est difficile du fait de la diversité des tâches, des mouvements, des protocoles expérimentaux, et des grandeurs mesurées. L'interprétation des résultats conduit à la mise en évidence de tendances à défaut de mener à la vérification de lois. Si pour des mouvements d'atteinte sans contrainte d'orientation nous pouvons nous baser sur une synthèse de la littérature sur le mouvement humain, nous avons cependant dû mettre en œuvre de nouvelles expérimentations afin d'analyser les trajectoires dans l'espace de la tâche et les profils temporels pour le cas de mouvements contraints en position et orientation.

3.2 Définition du cadre expérimental

3.2.1 Capture de mouvements et conditions expérimentales

Nous nous intéressons à la capture de mouvements d'atteinte (sans prise) effectués par un opérateur sur un poste de travail. Ces mouvements sont répétitifs et la séquence à effectuer est connue de l'opérateur préalablement à sa réalisation. Ainsi, avant de capturer les mouvements effectués par les sujets de l'étude, chacun d'eux effectue plusieurs séquences dites d'entraînement. La séquence à effectuer est indiquée à l'opérateur sans mentionner la façon de la réaliser afin que les stratégies mise en œuvre par le sujet soient personnelles. La phase d'entraînement a pour objectifs :

- la limitation des erreurs liées à une mauvaise connaissance de la séquence (les points de passage doivent correspondre à la consigne),
- la réalisation d'un geste répétitif et spontané (le geste n'est ni appris ni guidé),
- l'accoutumance à l'appareillage (marqueurs placés sur son corps).

Le système de capture optique utilisé est le système ARTrack illustré sur la figure 3.1. Ce dispositif, dit à "capture optique passive", est composé d'au minimum 2 caméras (figure 3.1 a)) qui émettent des flashes infrarouges renvoyés par des sphères réfléchissantes aussi appelées marqueurs (figure 3.1 b)). Chaque caméra du système capture une image de la position des différents marqueurs selon un point de vue distinct. Ces différentes images sont transmises à un ordinateur qui réalise une opération de triangulation afin de localiser chaque marqueur. En effet, grâce à la détection des dispositions géométriques des boules réfléchissantes propres à chaque marqueur, le système peut identifier ce dernier et lui associer un repère, ce qui permet de connaître la position et l'orientation de certaines parties du corps de l'utilisateur. Ce genre de système a l'avantage d'avoir un grand volume de travail (un cube d'environ 4 mètres de coté par exemple pour le système ARTrack 2) permettant une action libre et directe des mouvements de l'utilisateur. Ce type de système est tributaire de phénomènes d'occultation de certains marqueurs : l'un des marqueurs est masqué par une partie du corps de l'opérateur dans une ou plusieurs des images prises par les caméras ce qui empêche la triangulation. Ce type de problème peut être résolu par une augmentation du nombre de caméras ou par leur positionnement stratégique par rapport à l'utilisateur [Ladeveze 10]. La plate-forme utilisée pour réaliser nos expérimentations est un système ARTrack 2 doté de 4 caméras.

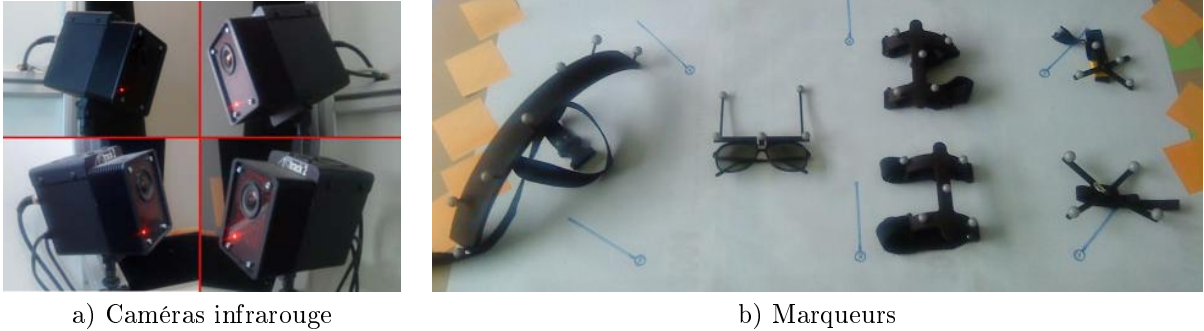


FIGURE 3.1 – Système ARTrack pour la capture de mouvement

Des mouvements capturés, nous souhaitons extraire la posture de la main, du poignet, du bras, du regard et du buste. Pour chaque organe d'intérêt, nous spécifions la position des marqueurs, elle est illustrée sur la figure 3.2.

Pour la **main**, les mouvements liés à la prise ne sont pas mesurés puisque l'objet de notre étude concerne seulement les mouvements d'atteinte. De fait, le mouvement interne lié à sa fermeture et à son ouverture reste limité au cours des expérimentations ; la main reste ouverte ou fermée suivant l'expérience. Nous considérons donc ici la main comme un solide indéformable, et le marqueur (figure 3.3) permet de mesurer la situation du centre de la main. Ce marqueur est volumineux et réduit les possibilités de placement du marqueur du **poignet**. Par ailleurs, les mouvements de prono-supination induits par le déplacement du radius et du cubitus limitent la distance du poignet au marqueur sur l'avant bras. Nous avons choisi de placer le marqueur à une distance d'environ 5cm du centre de l'articulation du poignet (figure 3.4). Le marqueur fixé sur le **bras** est positionné de sorte que la contraction musculaire du biceps n'entraîne pas de modification d'orientation du marqueur (figure 3.5 a). Afin d'évaluer le mouvement du **regard**, nous mesurons celui de la tête par l'enregistrement des données issue de lunettes portées par le sujet (figure 3.1 b). Enfin le sujet enfle une ceinture en dessous des côtes flottantes afin de capturer les mouvements du **buste** (voir la figure 3.5 b). Cette zone réduit l'influence de la respiration sur l'orientation du marqueur.

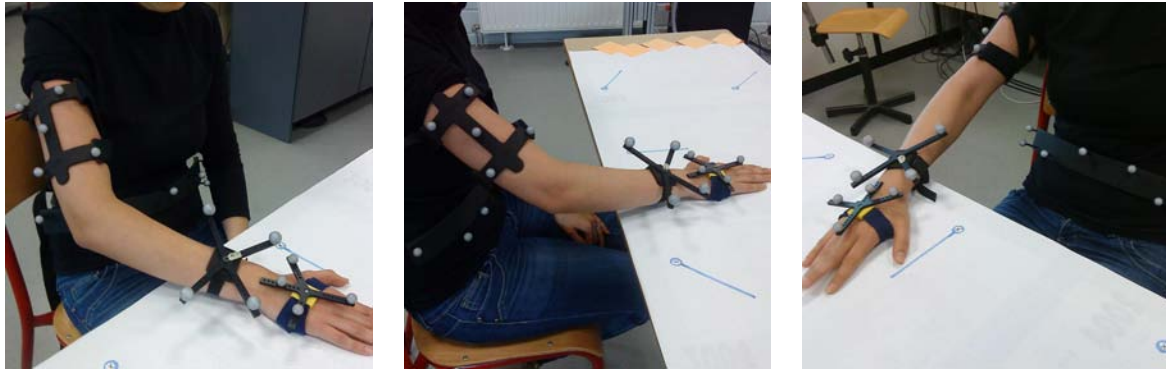


FIGURE 3.2 – Les marqueurs sont positionnés sur chaque sujet.

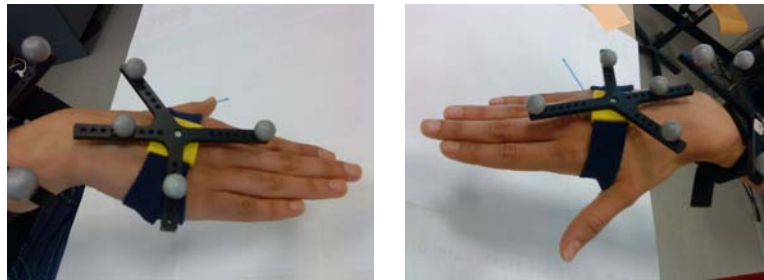


FIGURE 3.3 – Positionnement du marqueur de la main.

Les marqueurs dont nous disposons ne nous ont pas permis d'effectuer des mesures de déplacement de l'épaule. Cependant cette information peut être estimée à partir des mesures des autres marqueurs. Le détail des calculs concernant l'épaule est donné plus loin dans ce document (partie 5.3).

3.3 Mouvements contraints en position

L'objectif de ces premières expérimentations est de confronter nos expériences aux résultats issus de la littérature tels que décrits dans le chapitre 3.1, afin de :

- disposer de mesures significatives,
- valider notre protocole expérimental.

3.3.1 Protocole de mesure

Nous étudions les trajectoires de la main dans l'espace de la tâche pour des mouvements d'atteinte de différentes cibles à l'intérieur de l'espace de travail atteignable par un opérateur assis face à une table. Ces mouvements sont des mouvements proches de ceux effectués par un opérateur sur un poste d'assemblage. Nous reprenons le contexte expérimental de Morasso [Morasso 81] et de Flash et Hogan [Flash 85]. Dans notre expérimentation, l'opérateur doit simplement positionner le centre de la main sur chacun des 6 points représentant les cibles (cf. figure 3.6 a)), aucune consigne d'orientation n'est donnée. L'opérateur doit respecter l'ordre donné par la séquence 3.1. Les mouvements effectués sont alors numérotés de 1 à 7 comme illustré sur la figure 3.6 b)). Les coordonnées de chacun des points sont indiquées dans la table 3.1.

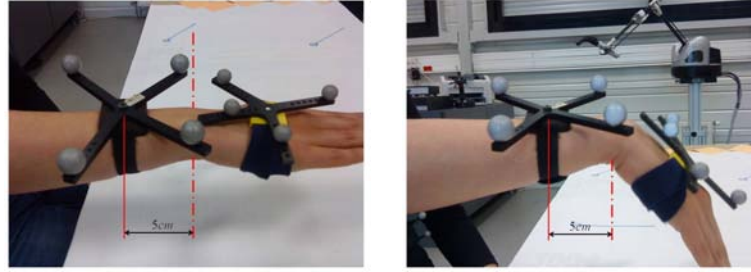
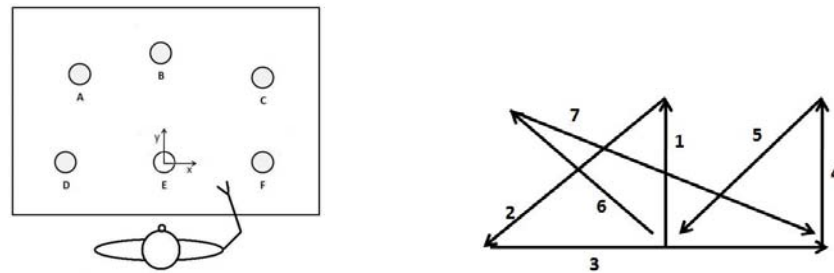


FIGURE 3.4 – Positionnement du marqueur du poignet.



FIGURE 3.5 – Positionnement des marqueurs sur le bras (à gauche) et le buste de chaque sujet (à droite).

$$E \Rightarrow B \Rightarrow D \Rightarrow F \Rightarrow C \Rightarrow E \Rightarrow A \Rightarrow F \quad (3.1)$$



a) Points à atteindre, cas de consignes en position. b) Numérotation des mouvements.

FIGURE 3.6 – Contexte expérimental.

3.3.2 Observations

L'expérience a été réalisée par **7 sujets** sains, droitiers, âgés de 24 à 29 ans, de taille variant entre 1,54m et 1,82m. Chacun des sujets a répété plusieurs fois l'expérience. Les trajectoires effectuées par chaque sujet et pour chaque essai sont données figure B.1 en annexe. L'observation visuelle des trajectoires effectuées pour chaque essai d'un sujet donné (figure 3.7), ainsi que pour différents sujets (figure 3.8), révèle une certaine variabilité.

Point	position X en cm	position Y en cm
A	-25	30
B	0	25
C	30	29
D	-30	0
E	0	0
F	30	0

TABLE 3.1 – Coordonnées des points sur la table (origine point E).

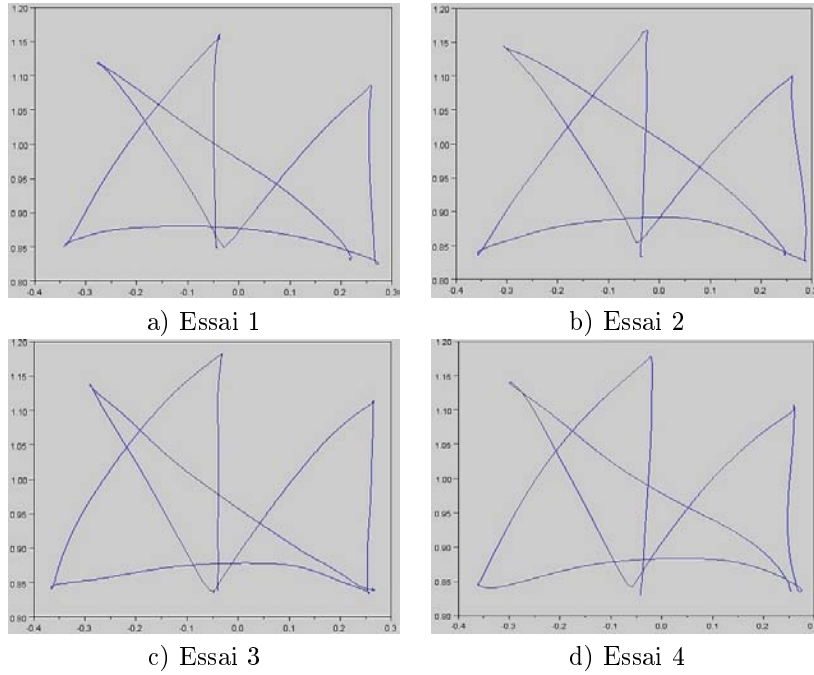


FIGURE 3.7 – Exemple de trajectoires spatiales planes de la main pour les 4 essais du sujet 1.

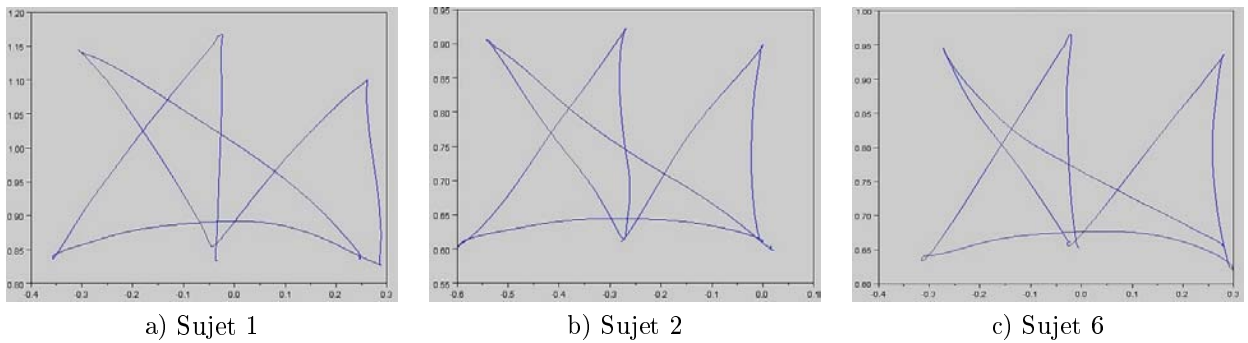


FIGURE 3.8 – Exemple de trajectoires spatiales planes de la main pour 3 sujets différents.

Afin d'estimer cette variabilité, pour chaque mouvement, chaque sujet, et chaque essai, nous calculons le coefficient de linéarité tel que défini dans l'équation 2.27. Les résultats sont donnés en détail en annexe

B.2, la valeur moyenne et l'écart type par sujet, puis pour tous les sujets et essais confondus sont donnés dans la table 3.2. Le calcul de cette moyenne globale est effectué pour tous les essais, ainsi comme le nombre d'essais n'est pas le même pour chaque sujet, elle n'est pas égale à la moyenne des valeurs de la colonne. **Cette remarque est valide pour tous les calculs de moyenne globale effectués dans le document.** Le graphique 3.9 permet d'avoir un retour visuel de l'information et vient compléter le tableau 3.2.

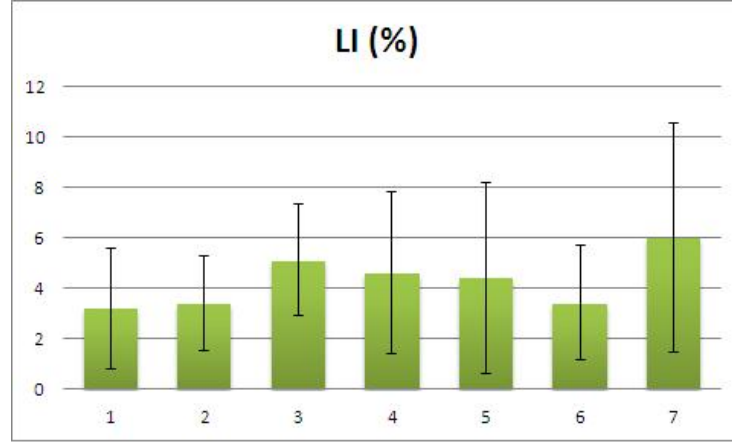


FIGURE 3.9 – Représentation de la moyenne et de l'écart type de déformations de trajectoire pour chaque mouvement. Cas du mouvement sans contrainte d'orientation.

Sujet	mvt 1		mvt 2		mvt 3		mvt 4		mvt 5		mvt 6		mvt 7	
	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ
1	2	1,04	5,4	2,64	7	0,81	3,5	2,63	4,1	0,91	2,8	0,6	4	0,72
2	2,8	0,73	3,5	1,49	6	2,25	8,8	3,57	3,8	1,24	2,5	1,21	2,9	1,58
3	3,8	3,87	2,5	1,93	3,2	0,63	3,5	0,63	3,6	1,77	3	1,51	7,4	7,33
4	2,3	1,2	4	1,34	6,3	2,65	2,8	1,33	5,6	2,68	6,2	3,77	5,8	2,33
5	3	0,49	2,7	1,51	3,2	0,54	3,3	0,98	1,5	0,5	2,29	0,76	9,2	0,68
6	8,2	—	3,3	—	8	—	9,4	—	1,7	—	3,3	—	6,9	—
7	3,7	0,96	2,9	1,9	5,5	0,8	4,7	0,89	13,6	12,16	3,4	0,04	5,7	5,85
Global	3,2	2,38	3,4	1,88	5,1	2,21	4,6	3,22	4,4	3,79	3,4	2,27	6	4,53

TABLE 3.2 – Moyenne et écart-type des mesures de déformation des trajectoires par sujet et tous sujets et essais confondus. Cas du mouvement sans contrainte d'orientation.

Pour la quasi totalité des mouvements, on mesure un coefficient de linéarité moyen inférieur à 4,6% avec un écart type inférieur à 3. Les mouvements sont donc effectivement différents mais très proches de la ligne droite. Les trajectoires fournies par les mouvements 3 et 7 ont des *LI* moyens supérieurs à 5%. Pour ces deux mouvements, la longueur de la trajectoire est élevée, leur amplitude est grande, de plus, le mouvement 3 s'effectue à proximité du buste. Dans ces deux mouvements, l'opérateur a tendance à courber la trajectoire. Enfin, dans quelques cas, on note un *LI* important avec un grand écart-type, comme par exemple dans le cas du sujet 7 mouvement 5. Cette valeur est due au fait que le mouvement réalisé sur un des essais est très différent de celui de l'autre essai (et des essais des autres sujets, Cf. figure B.1 en annexe). C'est aussi le cas pour le sujet 2 mouvement 4 pour lequel le deuxième essai est différent des 5 autres (cf. figure B.1 en annexe). **Les expérimentations confirment que dans le cas de mouvement**

de pointage dans le plan horizontal, vers des cibles proches du centre de l'espace de travail, les trajectoires peuvent être approximées par des lignes droites.

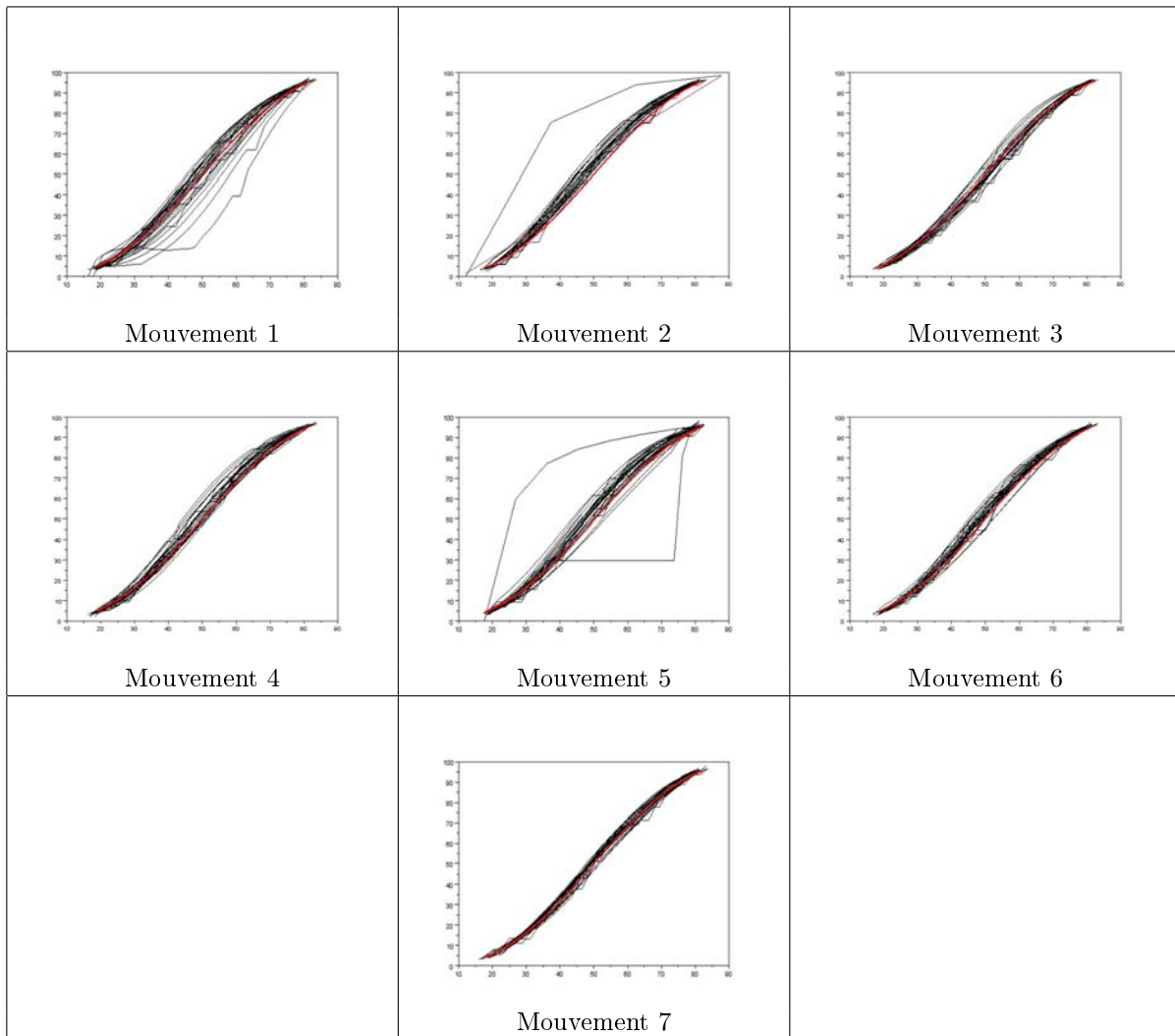


FIGURE 3.10 – Profil temporel des mouvements de tous les sujets, pour tous les essais (en rouge minimum jerk). Cas du mouvement sans contrainte d'orientation. Les axes sont normés en abscisses et en ordonnées. L'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin accompli.

Le profil temporel de chacun des mouvements est comparé à la loi du minimum jerk (voir 2.5.3.1), les résultats obtenus sont donnés figure 3.10. Les profils temporels mesurés pour chacun des sujets et pour chaque essai sont représentés en noir, le minimum jerk (la référence) est en rouge. La mesure des durées pour chaque essai et par sujet est donnée dans le tableau B.3 en annexe. La valeur moyenne et l'écart type par sujet, puis pour tous les sujets et essais confondus sont donnés dans la table 3.3 et illustrés sur le graphique 3.11. L'observation des courbes indique que le profil temporel de la main est très proche d'une loi temporelle de type minimum jerk pour l'ensemble des mouvements. Dans le cas des mouvement 2, 4, 5 et 6, les mouvements mesurés sont légèrement plus rapides que la référence (au-dessus). Là encore, les résultats mesurés confirment ceux décrits dans la littérature.

Sujet	mvt 1		mvt 2		mvt 3		mvt 4		mvt 5		mvt 6		mvt 7	
	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ
1	1329	344	750	157	850	164	521	180	604	114	604	114	1225	87
2	1189	154	686	78	767	47	644	95	694	83	700	124	1381	95
3	1202	374	931	240	980	257	874	341	885	257	957	352	1403	378
4	1217	246	744	113	883	106	783	110	778	79	844	98	1506	257
5	1283	99	758	134	825	127	571	123	654	37	688	63	1413	104
6	1700	0	500	0	767	0	667	0	800	0	733	0	1850	0
7	1275	35	550	24	750	71	617	94	775	389	592	35	1100	212
Global	1248	267	769	192	865	175	709	236	756	188	780	237	1392	266

TABLE 3.3 – Moyennes et écart-type des mesures de la durée de chaque mouvement par sujet et tous sujets et essais confondus. Cas du mouvement sans contrainte d’orientation.

Méthode	mvt 1	mvt 2	mvt 3	mvt 4	mvt 5	mvt 6	mvt 7
MTM R-A	311	399	529	336	418	399	548
MTM R-B	408	551	766	450	581	551	796
MTM R-C	459	595	802	498	624	595	832

TABLE 3.4 – Calculs des durées de chaque mouvement par la méthode du MTM. Cas du mouvement sans contrainte d’orientation.

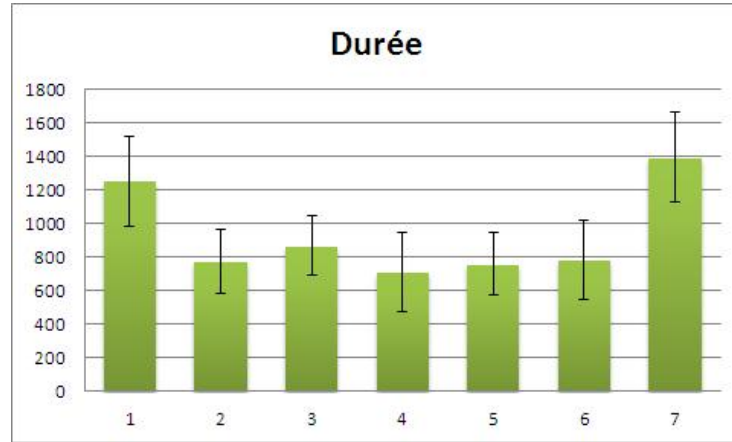


FIGURE 3.11 – Représentation de la moyenne et de l’écart type de la durée de chaque mouvement. Cas du mouvement sans contrainte d’orientation.

Concernant les durées de chaque mouvement, nous pouvons observer que les sujets adoptent des vitesses différentes mais relativement proches pendant leurs essais. Il est ainsi possible d’extraire une durée moyenne du mouvement et de la comparer avec les prédictions calculées par la méthode MTM [MTM 96] données dans la table 3.4. La valeur de durée calculée est nettement inférieure aux valeurs moyennes que nous avons mesurées. Lors de nos expérimentations, nous nous sommes attachés à conserver des mouvements qui ne sont que très peu soumis à des automatismes. Contrairement aux opérateurs, les sujets ne sont pas soumis à des impératifs de production. Il en ressort que les temps de cycle des sujets capturés sont nettement supérieurs aux prédictions utilisées par les entreprises.

3.4 Mouvement contraint en rotation

Avant de réaliser une analyse sur des contraintes couplées entre translation et rotation, nous souhaitons avoir un aperçu de la gestuelle humaine dans le cas d’une contrainte d’orientation seule. Nous ne testons ce mouvement que sur un seul sujet. Ce type de contrainte unique est difficile à exprimer à cause notamment de la définition de la tâche qui en découle. Une contrainte de position sur la main va naturellement s’ajouter de manière implicite. En effet, la rotation d’un corps nécessite un axe de rotation et implique à la fois un changement d’orientation, mais également un déplacement en translation de tout point appartenant à ce corps. Les points appartenant à la fois au corps et à l’axe de rotation ne sont pas soumis à un changement de position. Cependant, ces points sont également contraints en position à cause de leur immobilité qui implique une translation nulle. Cette expérience doit nous permettre de répondre à la question suivante :

Que se passe-t-il pour un déplacement en rotation de la main lorsque celle-ci change peu (ou pas) de position ?

N’ayant que peu d’information disponible dans la littérature, nous avons effectué notre propre expérimentation. Nous utilisons une table munie d’un point d’où partent 2 segments. Ces segments sont orientés à -45° et $+45^\circ$. Cette table est illustrée sur le schéma 3.12. Le sujet mesuré se tient assis devant la table. Le point utilisé a pour coordonnée $(x = 30\text{cm}, y = 0\text{cm})$ selon le repère du schéma. Le point positionné sur la table se situe à 30 cm de l’épaule suivant y .

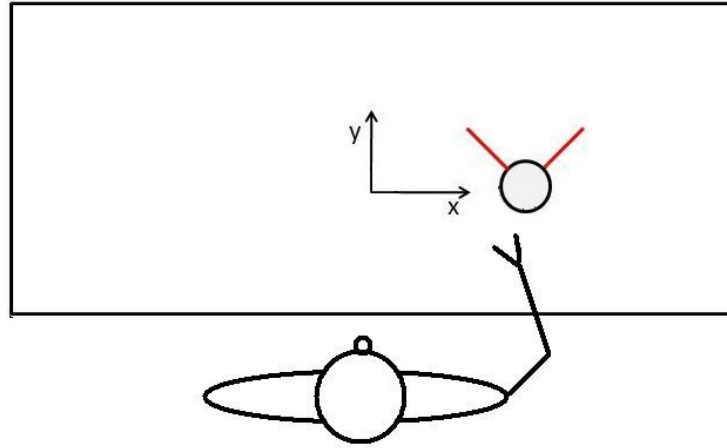


FIGURE 3.12 – Table utilisée lors de l’expérimentation d’un déplacement de la main en rotation. Cas du mouvement en rotation.

Nous demandons au sujet d’orienter son index pour l’aligner avec les segments orientés. Ainsi, la main du sujet doit réaliser un déplacement de -45° et $+45^\circ$.

Concernant la trajectoire spatiale dans $SO(3)$, une visualisation du mouvement de la main est représentée par la figure 3.13. Nous obtenons un écart maximal par rapport à la géodésique de $8,7^\circ$, soit un $DI \approx 12\%$ (mesure de l’écart à la trajectoire de référence qui est définie par l’équation 2.34). Par conséquent, la main ne suit pas exactement le chemin géodésique en rotation. Nous pouvons également observer cet écart grâce aux boîtes orientées.

Le profil temporel associé à ce mouvement de rotation dans $SO(3)$ est visible sur le schéma 3.14.

Le profil temporel acquis est comparé au profil temporel de référence que nous employons (le “minimum jerk”). Nous obtenons des profils relativement proches l’un de l’autre, ce qui montre que cette loi de temps permet d’estimer de façon correcte l’évolution de la vitesse au cours du temps.

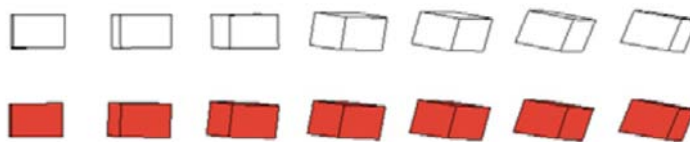


FIGURE 3.13 – Visualisation du mouvement capturé par le biais de boîtes orientées. Le chemin géodésique est représenté par les boîtes en rouge. Cas du mouvement en rotation.

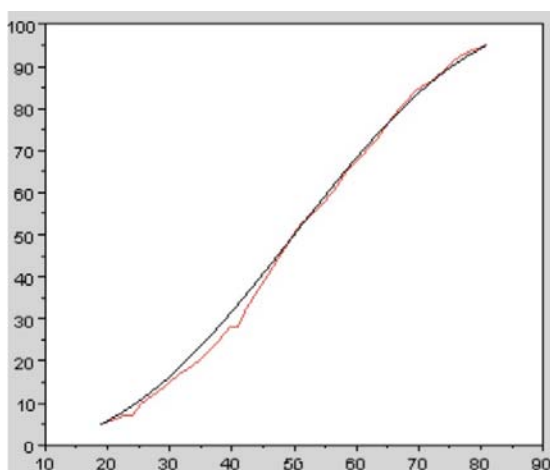


FIGURE 3.14 – Profil temporel acquis (en rouge) comparé à la loi de référence (en noire, le "minimum jerk"). Cas du mouvement en rotation. Les axes sont normés, l'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin accompli.

3.4.1 Discussion

Cette acquisition de mouvement nous donne un premier aperçu de l'évolution de la main dans l'espace des rotations. Nous utilisons ces résultats préliminaires afin de créer un protocole d'expérimentation contraignant position et orientation qui soit adapté à ce que nous souhaitons observer. Nous avons également obtenu une première estimation de l'écart à la géodésique. Cet écart (DI d'environ 12%) indique que la main ne suit pas strictement le chemin le plus court en rotation. Nous avons également pu visualiser cet écart à l'aide des boîtes orientées.

Le profil temporel acquis correspond à une loi de type "minimum jerk". C'est également cette même loi qui caractérise le mouvement de translation de la main. Nous pouvons émettre une première hypothèse sur la synchronisation qu'il peut exister entre translation et rotation de la main. En effet, si ces deux composantes possèdent (ou s'approchent de) la même loi de temps, il n'est pas impossible qu'elles soient synchronisées.

Cette expérimentation amène donc des questions supplémentaires notamment sur l'aspect de la synchronisation. Nous allons essayer d'y répondre en effectuant des mouvements couplant à la fois des contraintes de positionnement et d'orientation.

3.5 Mouvement avec contraintes couplées

L'objectif de ces nouvelles expérimentations est de disposer de mesures sur des mouvements effectués par un opérateur lorsque la consigne imposée à l'organe terminal (la main) de l'opérateur le contraint en position et en orientation. Ces données sont exploitées dans les espaces \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Les trajectoires spatiales et les profils temporels pour chacun des deux espaces sont étudiés afin de mettre en évidence des invariants s'ils existent. Enfin, ces données constitueront une base au schéma de génération de mouvement qui sera mis en place dans les prochains chapitres.

3.5.1 Protocole de mesure

Afin d'étudier les trajectoires de la main dans l'espace de la tâche pour des mouvements d'atteinte, nous réalisons des mesures dans un contexte expérimental proche de celui décrit dans la section 3.3.1, en ajoutant une contrainte d'orientation en chacun des points de la table. Les sujets doivent placer le centre de leur main sur chacune des cibles en alignant le majeur avec les segments tels que représentés sur la figure 3.15. L'opérateur doit toujours respecter l'ordre donné par la séquence 3.1, et les mouvements effectués sont encore numérotés de 1 à 7 (figure 3.6 b)). Les coordonnées de chacun des points sont indiquées dans le tableau 3.5.

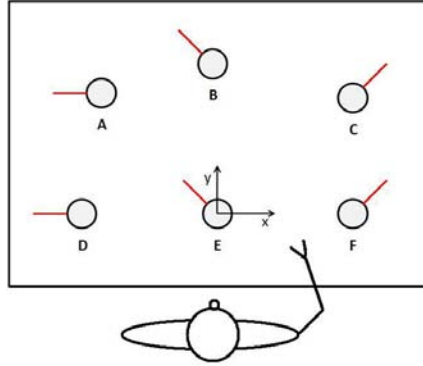


FIGURE 3.15 – Points à atteindre, cas de contraintes couplées.

Point	position X en cm	position Y en cm	orientation en degrés
A	-25	30	+90°
B	0	25	+45°
C	30	29	-45°
D	-30	0	+90°
E	0	0	+45°
F	30	0	-45°

TABLE 3.5 – Coordonnées des points et orientation des segments sur la table (l'origine étant le point E). Cas du mouvement avec contraintes couplées.

L'expérience a été réalisée par **5 sujets** sains, droitiers, âgés de 24 à 29 ans, de taille variant entre 1,54m et 1,82m. Chacun des sujets a répété plusieurs fois l'expérience. Les données enregistrées sont communiquées et commentées dans les paragraphes suivants.

3.5.2 Observations : Trajectoires spatiales en translation

Les trajectoires effectuées par chaque sujet et pour chaque essai sont données figure C.1 en annexe. L'observation visuelle des trajectoires effectuées pour chaque essai d'un sujet est donnée sur la figure 3.16, pour différents sujets, les résultats sont donnés sur la figure 3.17. L'observation de l'ensemble de ces courbes montre une certaine similarité (alternance entre ligne droite et ligne courbe).

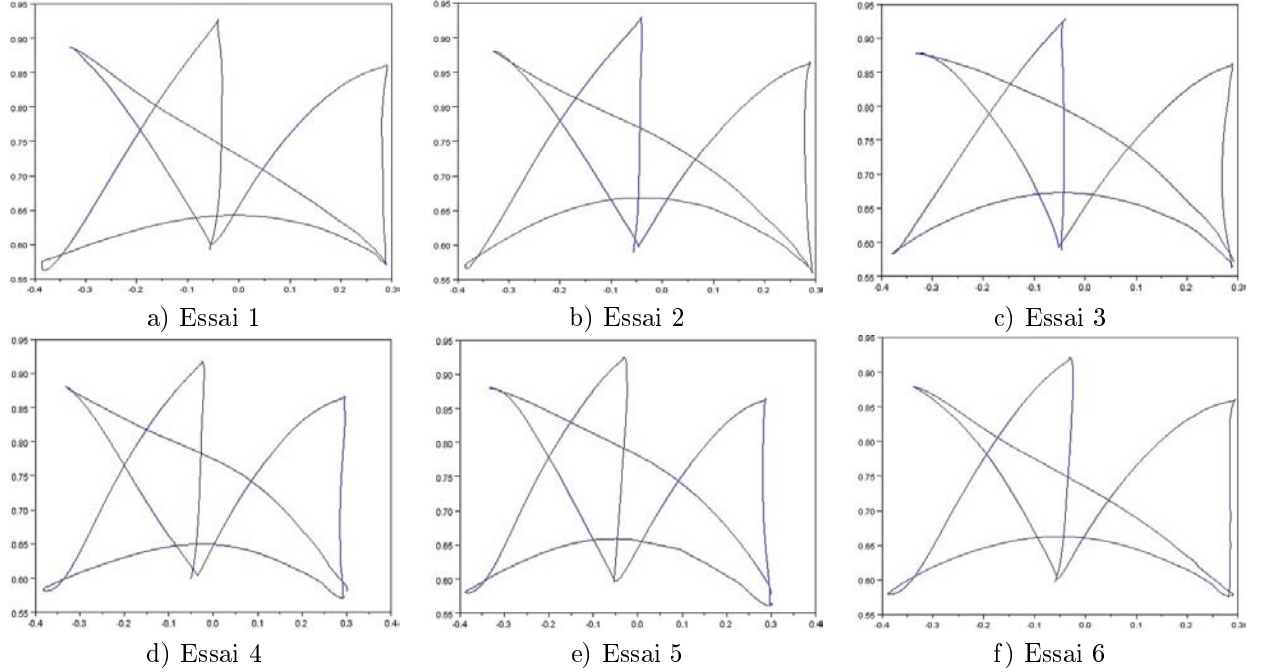


FIGURE 3.16 – Exemple de trajectoires spatiales planes de la main pour les 6 essais du sujet 3. Cas du mouvement avec contraintes couplées.

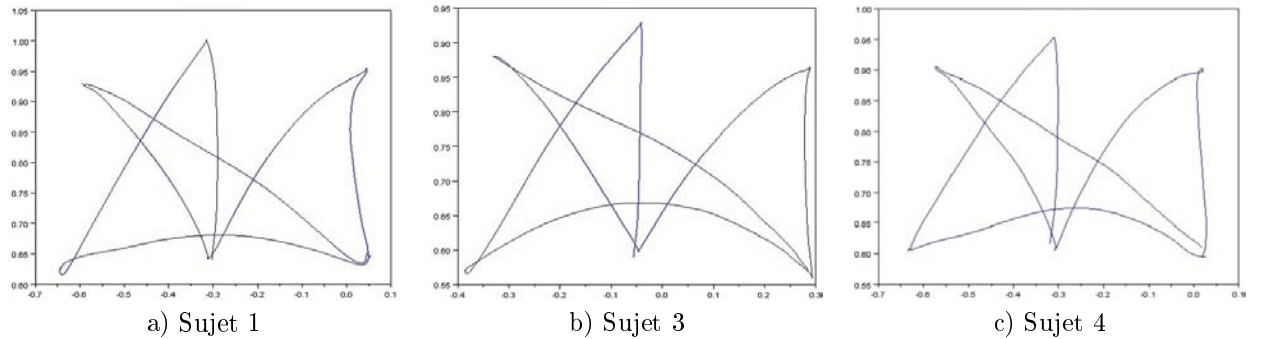


FIGURE 3.17 – Trajectoires spatiales planes de la main pour quelques essais. Cas du mouvement avec contraintes couplées.

Afin d'estimer cette variabilité, pour chaque mouvement, chaque sujet, et chaque essai, nous calculons le coefficient de linéarité tel que défini dans l'équation 2.27. Les résultats sont donnés en détail en annexe table B.2, la valeur moyenne et l'écart type par sujet, puis pour tous les sujets et essais confondus sont donnés dans la table 3.6 et illustrés dans le graphique 3.18.

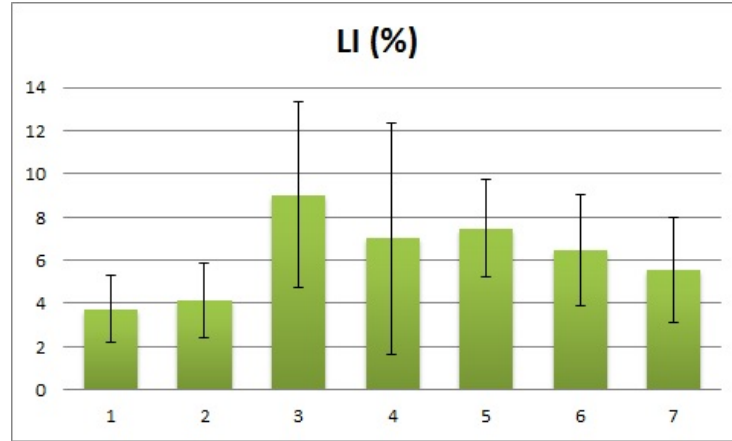


FIGURE 3.18 – Moyenne et écart type de l'index de linéarité de chaque mouvement. Cas du mouvement avec contraintes couplées.

Sujet	mvt 1		mvt 2		mvt 3		mvt 4		mvt 5		mvt 6		mvt 7	
	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ	LI	σ
1	5,86	0,61	3,23	0,63	5,69	1,54	13,96	1,45	7,90	1,95	7,14	1,26	3,61	1,41
2	4,16	0,75	6,14	2,17	11,15	3,59	9,59	7,1	6,51	0,84	4,68	0,52	6,39	0,83
3	3,27	1,17	3,42	0,89	12,70	2,09	3,90	1,35	8,00	0,85	6,01	2,58	5,90	2,86
4	2,50	0,87	3,64	1,33	10,73	1,71	3,08	1,29	9,53	2,87	9,49	2,92	5,03	2,84
5	2,24	0,92	5,00	2,29	2,17	0,16	3,52	1,70	4,26	1,88	4,34	1,60	7,55	2,77
Global	3,74	1,56	4,13	1,72	9,03	4,29	7,02	5,36	7,47	2,25	6,44	2,56	5,54	2,45

TABLE 3.6 – Moyennes et écart-type des mesures de déformation des trajectoires par sujet et tous sujets et essais confondus. Cas du mouvement avec contraintes couplées.

Seuls les mouvements 1 et 2 ont un coefficient de linéarité moyen inférieur à 4,13% avec un écart type inférieur à 2. Pour les autres trajectoires le coefficient de linéarité moyen est compris entre 5,54% et 9,03%. Pour les mouvements 5, 6 et 7, l'écart type est inférieur à 3 alors que pour les mouvements 3 et 4 il est supérieur à 4. Dans le cas du mouvement 4, cela s'explique par la disparité entre les sujets, le sujet 1 courbant beaucoup plus ce mouvement que les autres et le sujet 2 ayant effectué des trajectoires différentes pour ce mouvement (cf. figure C.1 en annexe). **L'introduction de la contrainte d'orientation conduit les sujets à courber les trajectoires de façon plus prononcée que dans le cas des mouvements avec contrainte de position seule.**

3.5.3 Observations : Trajectoires spatiales en rotation

Pour visualiser la trajectoire dans $SO(3)$, nous utilisons plusieurs représentations (cf. paragraphe 2.5.2.2) :

- les boîtes orientées permettent de visualiser la direction moyenne de déformation (colonne Boîte sur les figures situées en annexe).
- Les courbes d'erreur permettent de mettre en évidence la valeur des écarts constatés entre l'orientation sur la géodésique et l'orientation sur la trajectoire observée (colonne Erreur sur les figures situées en annexe, a) sur les figures internes à ce paragraphe). Elles représentent l'évolution de l'erreur de trajectoire spatiale en rotation durant le mouvement.
- Les directions de déformation représentées par leur axe, permettent de visualiser la direction de

déformation là où l'erreur constatée est la plus importante (colonne Axe sur les figures situées en annexe, b) sur les figures internes à ce paragraphe).

Pour chaque sujet et pour chaque mouvement, les trajectoires réalisées sont présentées par le biais des ces 3 représentations, en annexe, figures C.1 à C.35. Pour chaque mouvement, les courbes d'erreur et les directions de déformation de tous les sujets et de tous les essais sont superposées sur le même graphique et présentées sur les figures 3.19 et 3.20.

Afin de comparer les résultats obtenus pour chacun des mouvements, les courbes d'évolution de l'erreur sont représentées avec un axe vertical borné à 25° . Les valeurs supérieures à 25° sont observées pour des cas particuliers commentés ci-après.

Pour les courbes d'erreurs, la valeur maximum et la valeur moyenne, par sujet et par essai sont données respectivement dans les tables C.4 et C.5 en annexe. La valeur moyenne et l'écart type par sujet, puis pour tous les sujets et essais confondus sont donnés dans la table 3.7 pour l'erreur maximum et dans la table 3.8 pour l'erreur moyenne.

Sujet	mvt 1		mvt 2		mvt 3		mvt 4		mvt 5		mvt 6		mvt 7	
	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ
1	9,82	2,28	6,54	1,15	7,69	1,61	9,55	2,05	11,56	3,88	10,71	1,28	10,61	2,25
2	10,29	2,02	10,33	2,01	15,28	5,57	10,17	2,36	9,59	1,46	6,87	3,39	14,19	2,61
3	7,54	1,10	7,31	2,60	9,47	0,71	7,35	1,11	8,50	1,67	9,66	1,57	9,66	2,31
4	12,29	1,17	13,85	7,76	26,66	9,71	8,84	1,42	18,41	14,47	13,35	1,78	31,17	11,41
5	14,21	3,95	13,92	0,59	18,45	3,86	16,30	2,93	12,65	2,15	14,73	1,87	17,55	6,59
Global	10,33	2,95	9,78	4,58	14,47	8,29	9,85	3,31	11,76	6,83	10,75	3,17	15,69	9,44

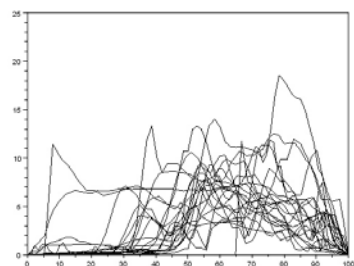
TABLE 3.7 – Moyenne et écart-type de l'écart maximal à la géodésique dans $SO(3)$, pour chaque sujet. Cas du mouvement avec contraintes couplées.

Sujet	mvt 1		mvt 2		mvt 3		mvt 4		mvt 5		mvt 6		mvt 7	
	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ	e	σ
1	3,07	0,44	3,49	0,54	3,48	0,85	4,20	0,63	5,10	2,20	4,34	0,44	3,20	0,91
2	2,63	1,01	4,05	1,39	5,70	2,02	3,77	0,39	3,85	1,03	2,80	1,28	4,97	0,71
3	2,69	0,25	3,14	0,89	3,62	0,44	3,92	0,35	3,62	0,74	3,95	0,57	2,90	0,84
4	3,71	0,92	7,24	4,97	8,92	3,11	3,98	0,52	7,40	4,46	6,29	0,82	6,61	1,52
5	4,79	2,46	7,06	1,51	9,44	1,84	8,46	1,73	6,65	1,57	6,83	2,13	6,77	5,04
Global	3,24	1,20	4,67	2,72	5,72	2,97	4,58	1,72	5,10	2,56	4,65	1,70	4,55	2,43

TABLE 3.8 – Moyenne et écart-type de l'écart moyen à la géodésique dans $SO(3)$, pour chaque sujet. Cas du mouvement avec contraintes couplées.

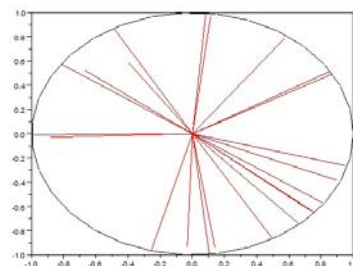
Mouvements 1 et 4 Les trajectoires réalisées au cours du mouvement 1 et 4 sont décrites sur la figure 3.19. Pour le détail de chaque sujet et essai, il est nécessaire de se reporter aux figures C.1 à C.5 pour le mouvement 1 et aux figures C.16 à C.20 pour le mouvement 4.

Dans ces mouvements, les orientations initiale et finale de la main sont identiques donc pas de changement d'orientation au niveau de la consigne. Cependant, nous pouvons constater en regardant les courbes d'évolution de l'erreur (figure 3.19 a)), que la main change d'orientation durant le geste. Pour le mouvement 1, l'écart maximal moyen à la géodésique est de $10,33^\circ$, et en moyenne cet écart vaut $3,24^\circ$ (tables 3.7 et 3.8). Pour le mouvement 4, l'écart maximal moyen à la géodésique est de $9,85^\circ$, et en moyenne cet écart vaut $4,58^\circ$ (tables 3.7 et 3.8). Ces valeurs sont du même ordre que celles mesurées et calculées pour le mouvement 1. L'écart moyen est légèrement supérieur au cas du mouvement 1, du fait des écarts mesurés pour le sujet 5.

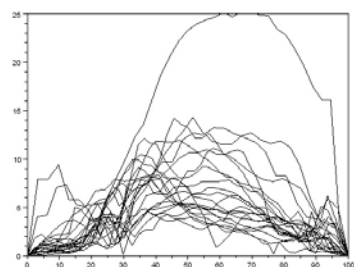


a)

Mouvement 1

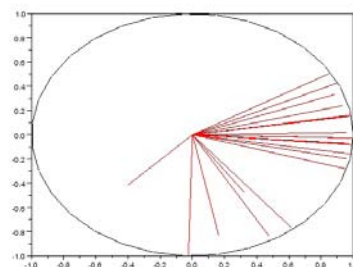


b)

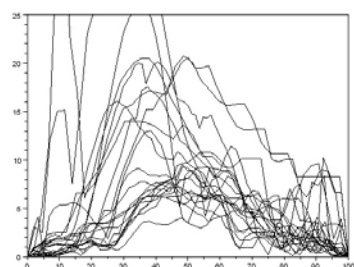


a)

Mouvement 2

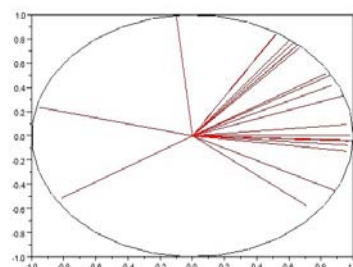


b)

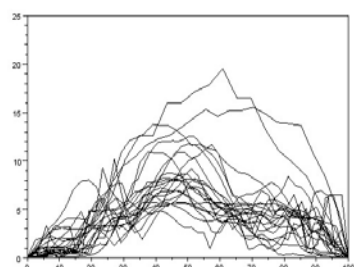


a)

Mouvement 3

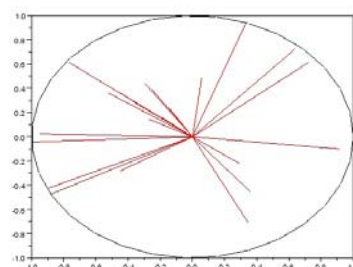


b)



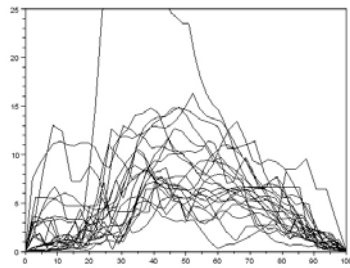
a)

Mouvement 4



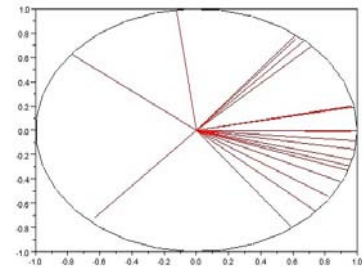
b)

FIGURE 3.19 – Courbe d'évolution de l'erreur (a) et des directions de déformation (b) pour l'ensemble des essais sur les 4 premiers mouvements.

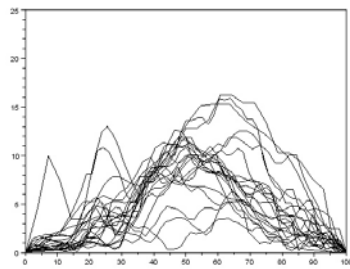


a)

Mouvement 5

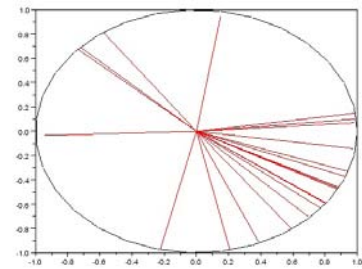


b)

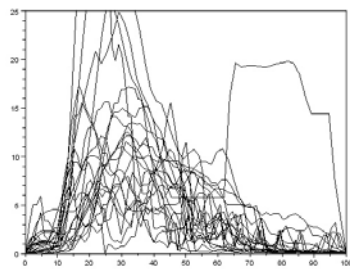


a)

Mouvement 6

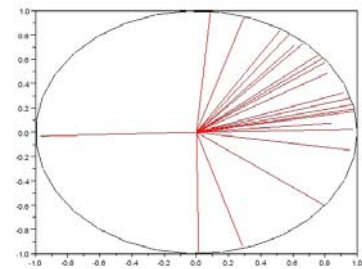


b)



a)

Mouvement 7



b)

FIGURE 3.20 – Courbe d'évolution de l'erreur (a) et des directions de déformation (b) pour l'ensemble des essais sur les 3 derniers mouvements.

Les directions de déformation pour ces deux mouvements représentées sur la figure 3.19 b) sont réparties sur le cercle, il n'apparaît pas de direction préférentielle. Ces gestes peuvent traduire le fait que la main (et le reste du corps) se repositionne provisoirement dans une posture qui lui convient mieux afin de réaliser la tâche.

Les orientations initiale et finale de la main étant identiques, la valeur de déformation DI perd de son sens puisqu'elle se base sur la distance géodésique entre ces deux orientations, les valeurs n'ont donc pas été calculées pour ces mouvements.

Ensemble des mouvements (sauf 1 et 4) Les trajectoires des mouvements 2 et 3 sont données sur la figure 3.19. Les trajectoires des mouvements 5, 6 et 7 sont visibles dans la figure 3.20. Dans un premier temps, nous pouvons observer que l'écart (moyen et maximal) à la géodésique est différent pour chaque mouvement. L'écart maximal moyen est compris entre $9,78^\circ$ (mouvement 2) et $15,69^\circ$ (mouvement 7). Les mesures de l'écart moyen à la géodésique sont plus proches pour l'ensemble des mouvements : entre $4,55^\circ$ pour le mouvement 7 et $5,72^\circ$ pour le mouvement 3.

Ces mesures de l'écart à la géodésique permettent d'affirmer que la géodésique est une bonne estimée de la trajectoire spatiale de la main mais qu'il apparaît un écart non nul à cette trajectoire de référence. Nous pouvons observer la direction de cet écart pour chaque mouvement sur les figures 3.19 b) et 3.20 b). Pour chaque mouvement, nous constatons une direction de déformation privilégiée, hormis pour le mouvement 6 où cette constatation concerne seulement une partie des sujets. Ces directions sont différentes d'un mouvement à l'autre mais sont toujours tournées vers la droite, ce qui indique un relèvement de la main.

Afin d'estimer la distance à la trajectoire de référence, pour chaque mouvement, chaque sujet et chaque essai, nous calculons l'indice de déformation DI (tel que défini dans l'équation 2.34). Les résultats sont donnés en détail en annexe table C.3, la valeur moyenne et l'écart type par sujet, puis pour tous les sujets et essais confondus sont donnés dans la table 3.9. Les résultats sont présentés dans le graphique 3.21.

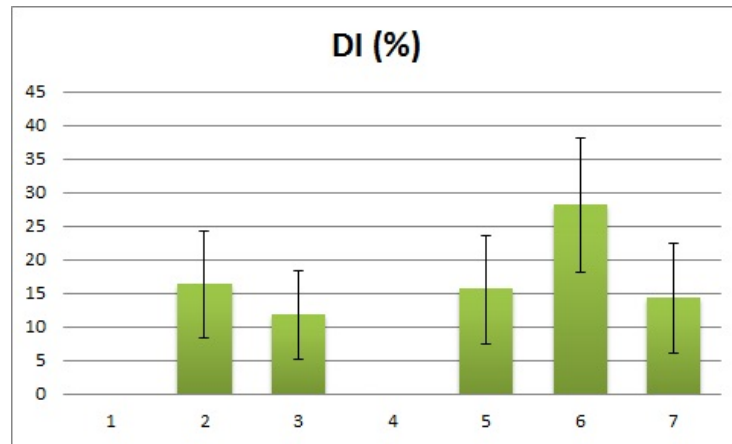


FIGURE 3.21 – Moyenne et écart type de la valeur de déformation DI dans $SO(3)$ de chaque mouvement.

Nous constatons que cette mesure DI dépend des mouvements avec la déformation la plus faible pour le mouvement 3 ($DI = 11,86\%$) et la déformation la plus forte pour le mouvement 6 ($DI = 28,16\%$). Pour chacun des mouvements et pour l'ensemble des sujets, ces valeurs de la mesure du DI nous permettent de définir des bornes inférieures et supérieures et ainsi de caractériser la trajectoire de la main en rotation.

Sujet	mvt 2		mvt 3		mvt 5		mvt 6		mvt 7	
	DI (%)	σ	DI (%)	σ	DI (%)	σ	DI (%)	σ	DI (%)	σ
1	12,19	2,49	5,76	1,16	12,81	4,35	25,52	2,55	8,38	1,74
2	17,17	3,03	15,48	5,87	18,77	3,34	19,91	10,78	17,85	3,29
3	10,36	1,00	7,47	0,65	9,42	1,91	22,56	4,11	7,52	1,84
4	25,92	12,72	19,32	7,10	18,62	14,63	38,41	6,71	23,63	8,71
5	21,79	1,05	16,01	3,95	24,36	3,72	41,11	6,30	20,39	8,43
Global	16,40	7,88	11,86	6,62	15,60	8,08	28,16	9,98	14,28	8,14

TABLE 3.9 – Moyennes et écart-type des mesures de déformation en rotation des trajectoires par sujet et tous sujets et essais confondus.

3.5.4 Observations : Synthèse trajectoires spatiales

Les valeurs de LI , de DI et des écarts moyens à la géodésiques sont du même ordre pour les mouvements semblables tels que les mouvements 1 et 4 où les orientations initiale et finale sont identiques. C’est aussi le cas pour les mouvements 2, 5 et 6 dont les variations angulaires ne sont pas nulles.

Concernant les mouvements 3 et 7, la contrainte angulaire est de grande amplitude. Les écarts à la géodésique sont similaires, et la direction de déformation privilégiée est dans le même quadrant. La déformation mesurée, DI , est légèrement supérieure dans le mouvement 7. La valeur du LI est au contraire plus importante pour le mouvement 3. La trajectoire est d’ailleurs plus courbée que dans le cas d’une contrainte en position seule pour le mouvement 3, et les valeurs de LI augmentées. Les deux contraintes sont difficiles à suivre, et il semble que les sujets effectuent un choix entre ces deux contraintes. C’est aussi le cas du mouvement 6 qui met en jeu le coude et l’épaule. En effet, pour ce mouvement, la mesure du DI est supérieure à celle de tous les autres mouvements et la trajectoire est très proche de la ligne droite.

3.5.5 Observations : Profil temporel

Le profil temporel de chacun des mouvements est comparé avec la loi du minimum jerk (se référer à la partie 2.5.3.1). Les résultats obtenus sont donnés pour l’espace \mathbb{R}^3 en figure 3.23 et pour l’espace $SO(3)$ en figure 3.24. Les profils temporels mesurés pour chacun des sujets et pour chaque essai sont représentés en noir, le minimum jerk (la référence) est en rouge. Pour l’espace $SO(3)$, le détail pour chaque mouvement et chaque essai (hors mouvements 1 et 4), est donné en annexe figures C.14 à C.19. La mesure des durées pour chaque essai et par sujet est donnée dans le tableau C.20 en annexe. La valeur moyenne et l’écart type par sujet, puis pour tous les sujets et essais confondus sont donnés dans la table 3.10 et illustrés sur le graphique 3.22.

Sujet	mvt 1		mvt 2		mvt 3		mvt 4		mvt 5		mvt 6		mvt 7	
	Durée	σ	Durée	σ	Durée	σ	Durée	σ	Durée	σ	Durée	σ	Durée	σ
1	1193	57	803	22	883	33	820	27	777	9	807	15	1440	271
2	1129	415	954	42	1208	177	971	117	971	129	1071	63	1379	142
3	1117	109	908	75	967	33	861	34	814	40	925	74	1403	155
4	1192	341	738	159	883	155	833	164	796	124	863	152	1400	289
5	1111	121	628	136	661	111	522	158	617	76	594	127	1150	257
Global	1149	218	823	139	935	189	820	162	804	127	868	165	1372	222

TABLE 3.10 – Moyennes et écart-type des mesures de la durée de chaque mouvement par sujet et tous sujets et essais confondus.

Concernant les **durées** de chaque mouvement, nous pouvons observer que les sujets adoptent des

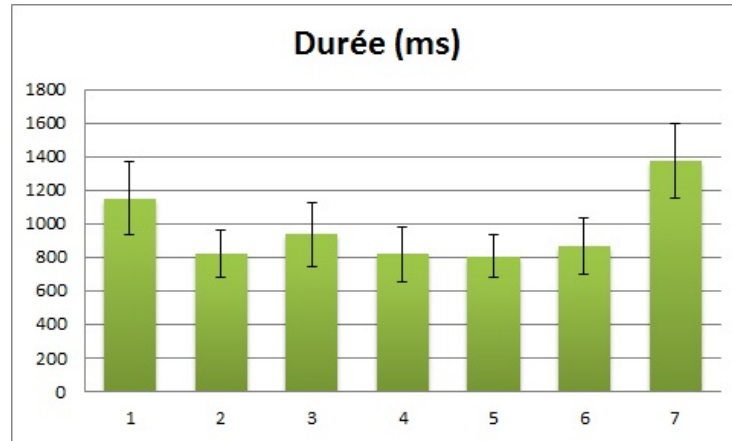


FIGURE 3.22 – Moyenne et écart type de la durée de chaque mouvement.

vitesses différentes mais relativement proches pendant leurs essais. La durée des mouvements est supérieure à celle des mouvements avec contrainte de position seule (tables 3.10 et 3.3), sauf pour le mouvement 1. On mesure une différence de 7% pour les mouvements 2 et 3, de 14% pour le mouvement 4, de 6% pour le mouvement 5 et de 10% pour le mouvement 6. Le mouvement 7 a une durée identique pour des mouvements contraints en position seule ou contraints en position et orientation. Seul le mouvement 1 est plus rapide, la différence mesurée est de 9%. Les ordres de grandeur de ces différences (14% au plus) sont identiques à ceux observés pour les différents essais d'un sujet pour chaque mouvement. **On peut ainsi conclure que la contrainte additionnelle de rotation n'a pas d'influence significative sur la durée du mouvement.**

Dans \mathbb{R}^3 , l'observation des courbes (figure 3.23) indique que le profil temporel de la main est très proche d'une loi temporelle de type minimum jerk pour l'ensemble des mouvements. Dans le cas des mouvement 1, 2, 4, 5 et 6, les mouvements mesurés sont légèrement plus rapides que la référence. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus dans le cas des mouvements avec contrainte de position seules (cf. figure 3.10).

Dans $SO(3)$ (figure 3.24), pour les mouvements 1 et 4, l'orientation finale de la main est identique à l'orientation initiale. Par conséquent, le profil temporel en rotation ne représente que la vitesse à laquelle la main s'éloigne de son orientation cible. Concernant les autres mouvements, nous pouvons remarquer, là encore, que le profil temporel de la main est très proche d'une loi temporelle de type minimum jerk pour l'ensemble des mouvements. La variation inter sujet est légèrement supérieure à celle constatée dans \mathbb{R}^3 .

3.5.6 Observations : Synchronisation temporelle

Nous étudions la synchronisation temporelle entre l'aspect de translation et l'aspect de rotation en superposant le profil temporel des mouvements dans \mathbb{R}^3 et dans $SO(3)$. Ainsi, nous réunissons dans les mêmes graphiques, l'évolution de la position (en rouge) et de l'orientation (en vert) de la main. L'ensemble des schémas placé en annexe permettant de juger de la synchronisation temporelle entre les différents espaces se trouve dans les figures C.21 à C.25.

Nous avons réuni dans la figure 3.25 les résultats de synchronisation pour un même sujet (sujet 3). La figure 3.26 présente les acquisitions de 3 sujets (sujets 1, 2 et 3) afin de visualiser les dispersions entre sujets observées lors de nos observations.

En observant ces résultats, nous pouvons dire que pour le mouvement numéro 6, la rotation de la main semble finir légèrement avant la fin de sa translation. Pour le reste des mouvements, **la translation et**

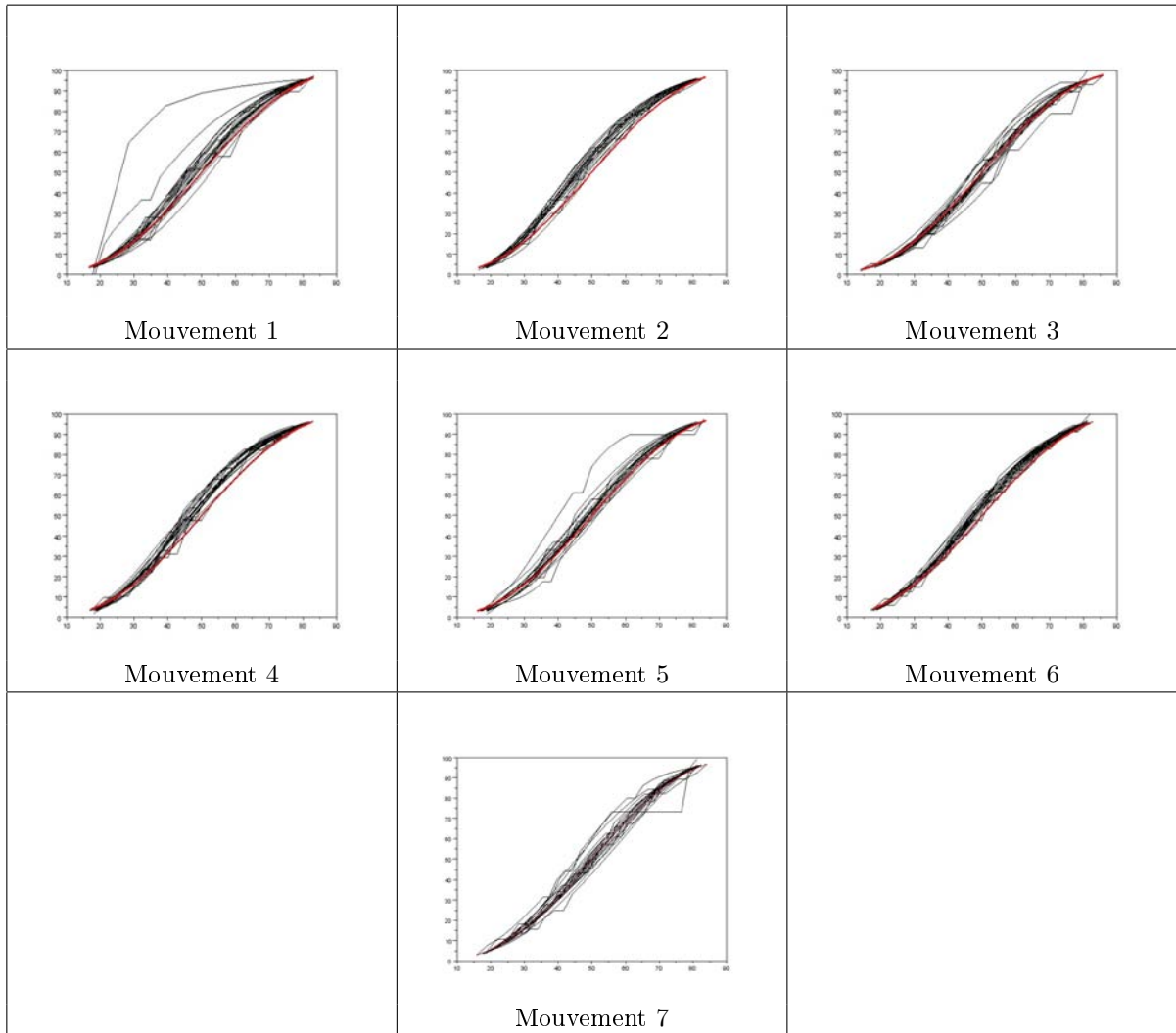


FIGURE 3.23 – Profil temporel des mouvements de tous les sujets dans l'espace \mathbb{R}^3 , pour tous les essais (en rouge minimum jerk). Les axes sont normés, l'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin parcouru.

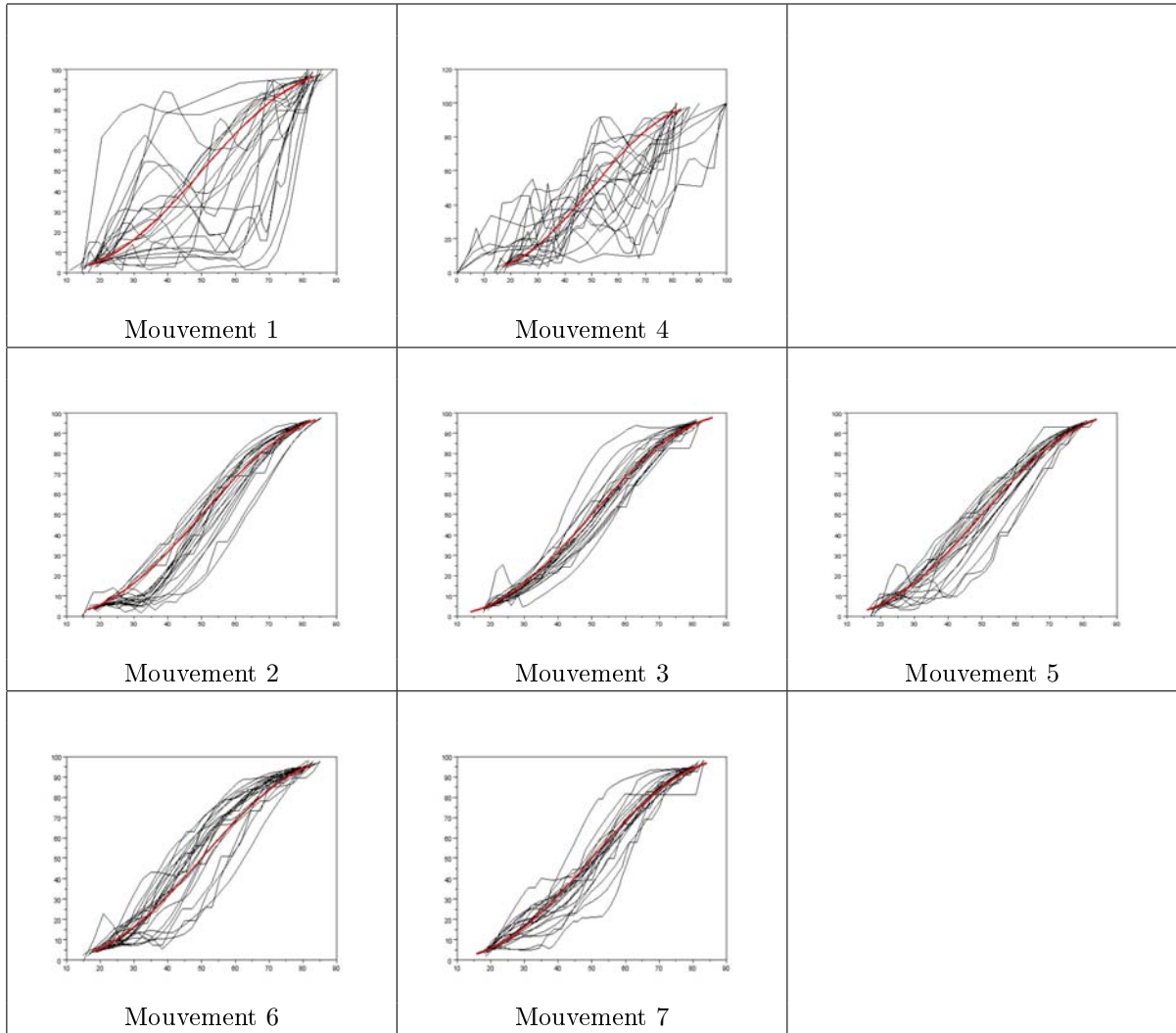


FIGURE 3.24 – Profil temporel des mouvements de tous les sujets dans l'espace $SO(3)$, pour tous les essais (en rouge minimum jerk). Les axes sont normés, l'axe horizontal représentant le temps et l'axe vertical représentant le pourcentage de chemin parcouru.

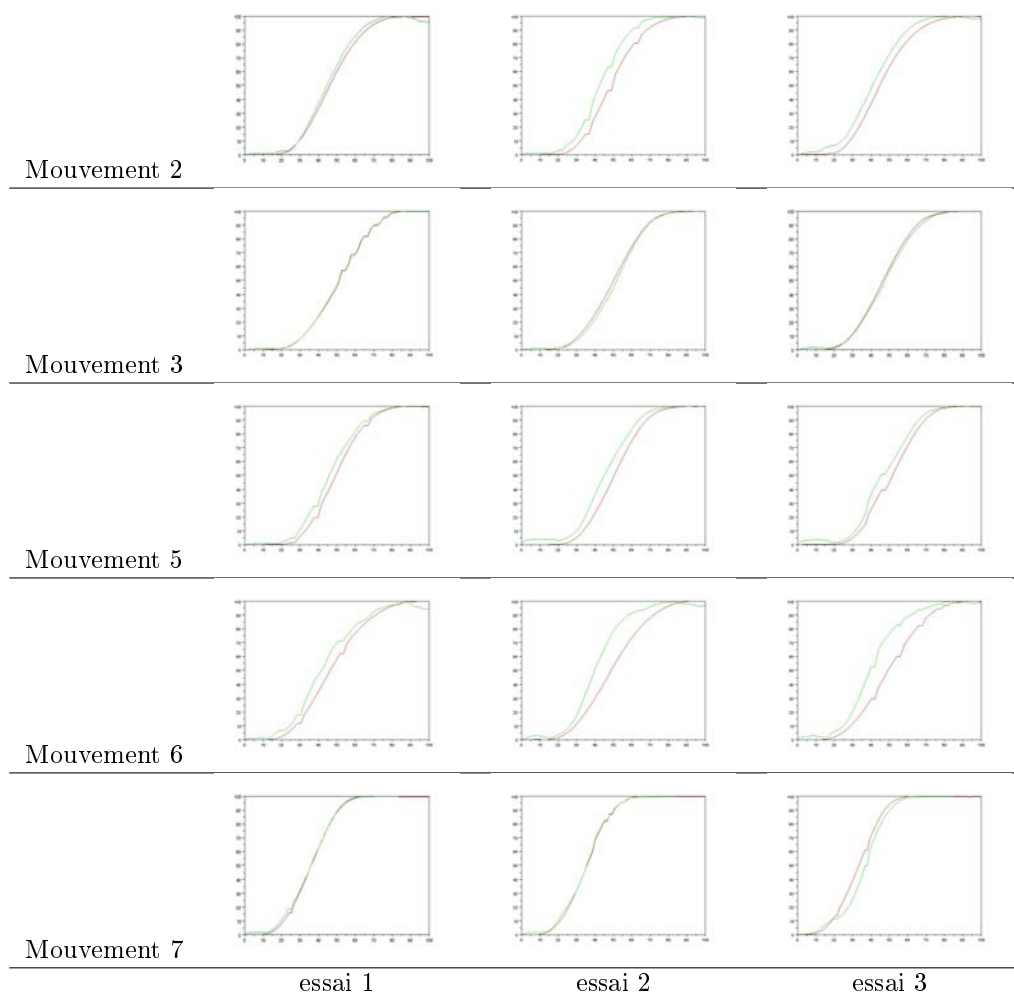


FIGURE 3.25 – Synchronisation temporelle pour un même sujet. La courbe rouge représente le profil temporel lié à la translation de la main. La courbe verte représente le profil temporel lié à la rotation de la main. Les axes sont normalisés entre 0 et 100%.

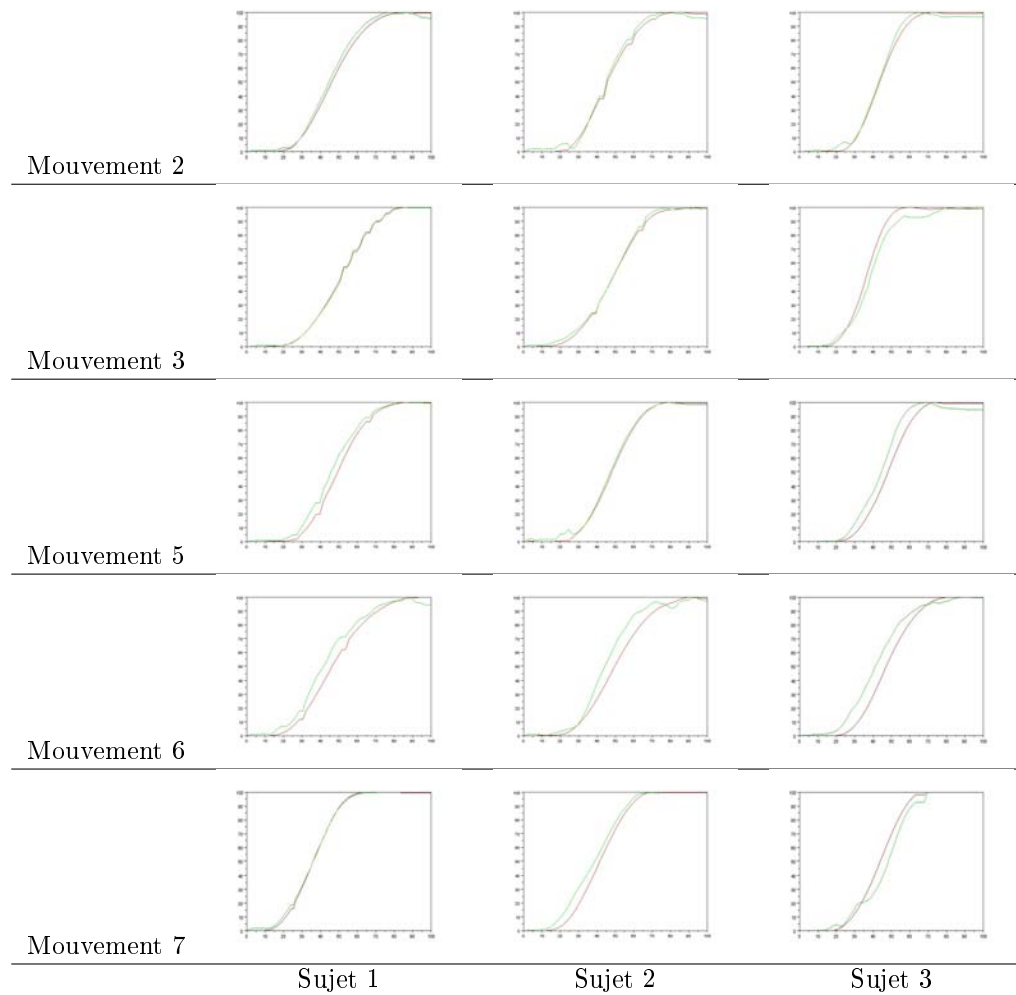


FIGURE 3.26 – Synchronisation temporelle de différents essais et mouvements pris en exemple. La courbe rouge représente le profil temporel lié à la translation de la main. La courbe verte représente le profil temporel lié à la rotation de la main. Les axes sont normalisés entre 0 et 100%.

la rotation de la main sont synchronisés. Ils débutent et finissent en même temps. En superposant les profils temporels de la main, nous observons pour les mouvements 2, 3, 5 et 7 une phase unique dans laquelle, la main commence à s'orienter dès le début du mouvement, dès son transport, tout comme pour le mouvement 6. Ces résultats sont en accord avec les conclusions concernant la synchronisation entre la position et l'orientation tels qu'indiqués dans la section 3.1.

3.5.7 Discussion

Nous synthétisons l'ensemble des résultats et conclusions obtenus lors des acquisitions de mouvements contraints en position et orientation afin de dégager certaines lois de comportement. Ces résultats seront utilisés pour la génération automatique de mouvement. Nous décomposons cette synthèse en deux grandes parties : l'aspect spatial et l'aspect temporel. Pour chacune de ces parties, nous analysons la translation et la rotation de manière combinée.

L'observation des trajectoires spatiales dans \mathbb{R}^3 et l'étude des valeurs de LI indiquent que lors de l'ajout d'une contrainte d'orientation certaines trajectoires restent droites et d'autres sont courbées. Par exemple le mouvement 3 s'éloigne beaucoup plus de la géodésique que le mouvement 6. Les trajectoires obtenues lors des mouvements contraints en position et rotation sont plus déformées que celles du mouvement contraignant uniquement la position. Elles sont plus éloignées des chemins les plus courts. En effet, les mesures de déformations sont plus élevées et par conséquent, l'écart entre la trajectoire de la main et la géodésique est plus grand.

Concernant les trajectoires dans $SO(3)$, les mouvements 1 et 4 sont des cas particuliers puisque les orientations initiale et finale sont les mêmes. Il est donc difficile d'exploiter les données, mais au cours du mouvement un écart par rapport à la géodésique est mesuré en rotation $SO(3)$. Alors que l'orientation de la main devrait rester la même, celle-ci évolue au cours du temps. Nous expliquons ce phénomène par le fait que l'humain cherche à adopter une posture plus confortable pendant la réalisation du mouvement.

Vis à vis des mouvements restants, il semble qu'il existe là encore certains gestes proches des trajectoires géodésiques, et d'autres éloignés. En effet, ce constat est observé sur la mesure du DI . Dans le cas de la rotation, le mouvement 3 est le plus proche de la géodésique tandis que le mouvement 6 est le plus éloigné.

Ces remarques nous incitent à envisager que l'opérateur effectue un choix entre la contrainte d'orientation et celle de position lorsque le mouvement est trop contraint pour réaliser ces deux trajectoires. La priorité est donnée à l'une des deux contraintes. Aussi, lorsque la rotation de la main prime sur sa translation, le sujet s'applique à mieux suivre la trajectoire en rotation et délaisse la trajectoire en translation et inversement. **Cette notion nous amène naturellement à l'utilisation d'un système de priorisation pour le choix du schéma de génération automatique de mouvement.** Il nous est cependant impossible pour le moment de savoir suivant quel critère l'être humain opère ce changement de priorité. Une étude des mouvements internes de la chaîne cinématique via l'utilisation d'une méthode de rejeu pourrait nous renseigner davantage sur ce critère.

Pour en revenir à l'orientation de la main, nous avons observé que la direction de déformation (sauf pour les mouvements 1 et 4) est principalement orientée suivant x , ce qui correspond à un relèvement de la main. L'expérimentation impose aux sujets de poser la main sur chaque point, ces résultats peuvent donc être directement liés à notre protocole.

Sur le plan temporel, la contrainte additionnelle de rotation n'a pas d'influence significative sur la durée du mouvement. Nous observons pour chacun de ces mouvements que la main du sujet suit une loi temporelle de type minimum jerk. Cette conclusion permet de valider les informations issues de la bibliographie pour l'aspect position et apporte de nouveaux éléments de réponse quant aux lois qui régissent la rotation de la main dans l'espace de la tâche.

Enfin, pour tous les mouvements, nous observons une synchronisation temporelle entre les aspects position et rotation. En effet, les aspects de translation et de rotation commencent et se terminent en même temps.

3.6 Conclusion

Même si le mouvement humain est relativement simple à mesurer, il reste et demeure extrêmement complexe à comprendre. L'origine même de la gestuelle humaine est effectivement mal connue, d'autant plus qu'elle semble répondre à des facteurs aussi bien internes qu'externes. Sarlegna et al [Sarlegna 09] montrent en effet que la perception du monde extérieur est entachée d'erreurs chez l'être humain et que ces dernières affectent la gestuelle humaine.

Afin d'analyser le mouvement humain, il est donc nécessaire et obligatoire de cadrer le protocole de mesure autour d'une (ou plusieurs) expérience(s) simple(s), n'exposant que très peu le sujet aux stimuli externes. Il est également important de limiter les actions possibles de la personne en lui demandant par exemple de rester assise pour la durée de l'expérience ou simplement de ne pas se tromper dans la séquence à jouer. Cependant, cette limitation ne doit pas affecter (ou du moins très peu) la gestuelle naturelle. Les sujets se sont donc entraînés à chaque expérience pendant un laps de temps relativement court (entre 10 et 20 minutes) afin de connaître et réaliser la séquence sans se tromper, tout en conservant le naturel de chacun. Un geste trop appris aurait certainement eu des conséquences sur les résultats attendu que les mouvements auraient été davantage "mécaniques", n'ayant même plus besoin de regarder l'action pour pouvoir la réaliser.

C'est dans cette optique que nous avons défini un protocole de mesure spécifique pour chacune des expériences. Ces expériences ont permis de mettre en évidence certaines lois de comportement lorsque un humain est soumis à des tâches d'atteinte contraignant la main :

- en position,
- en orientation,
- en position et orientation.

Nous avons, à chaque fois, analysé les mouvements de la main dans l'espace de la tâche. Ces analyses, suivant les expériences, ont été menées dans \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Dans l'espace \mathbb{R}^3 , nous avons observé dans le cas de mouvement avec contrainte de positionnement seul, à la fois des lignes droites et de courbes. Observation également effectuée dans le cas de mouvements contraints en position et orientation. Nous retrouvons donc les différentes stratégies adoptées par l'humain décrites dans la littérature. Afin de quantifier la trajectoire spatiale de la main dans l'espace, nous avons utilisé les outils mis en place dans le chapitre précédent, notamment l'index de linéarité LI . Les valeurs moyennes des mesures et leur dispersion relevées dans les gestes capturés, nous ont permis de quantifier et mettre en évidence les différences de comportement de la main lorsque celle-ci est soumise à différentes contraintes. **Ainsi, lorsque nous ajoutons une contrainte d'orientation à la main, les trajectoires spatiales sont davantage courbées.** De plus, lorsque le mouvement est trop contraint pour réaliser les deux trajectoires, la priorité est donnée à une des deux contraintes. Pour cette raison, nous pensons qu'il existe des niveaux de priorité pour le déplacement de la main. Concernant le profil temporel nous avons noté que l'évolution de la position de la main au cours du temps correspond à un profil de type "minimum jerk".

Concernant l'orientation de la main, deux expériences nous ont permis de mettre en évidence la trajectoire de la main dans $SO(3)$. Une première où seule l'orientation est imposée et une seconde qui couple des contraintes de position et d'orientation de la main. Nous avons ainsi étudié la trajectoire spatiale dans $SO(3)$. Nous obtenons une trajectoire éloignée de la référence géodésique. L'évaluation de ces mesures est réalisée grâce aux outils que nous avons mis en place et notamment le DI . Les trajectoires sont également analysées visuellement par le biais de boîtes orientées et par la tracé de l'évolution de l'écart à la géodésique. Nous avons pu observer au cours de l'analyse de tels mouvements que le profil temporel du type "minimum jerk" semble globalement bien adapté pour représenter l'évolution de l'orientation de la main au cours du temps. Globalement seulement puisque nous avons observé quelques mouvements pour lesquels, l'accélération de la rotation de la main semble plus importante au début du mouvement. L'observation de la synchronisation entre la translation et la rotation nous permet de conclure que ces deux aspects sont parfaitement coordonnés, ils commencent et finissent en même temps.

Ainsi, nous avons caractérisé certaines lois de comportement auxquelles la gestuelle humaine semble

répondre dans le cas bien précis de geste d'atteinte dans le plan horizontal. C'est sur la base de ces constats que nous allons développer notre schéma de génération de mouvements.

Chapitre 4

Schéma de contrôle

4.1 Introduction

Au chapitre 2, nous avons fait le choix d'un modèle cinématique et donc d'un schéma d'évolution au premier ordre. Réaliser une tâche \mathbf{X} au niveau cinématique revient à calculer $\delta\mathbf{q}$ tel que :

$$\delta\mathbf{X} = J(\mathbf{q})\delta\mathbf{q} \quad \text{et} \quad f(\delta\mathbf{q}) \leq 0 \quad (4.1)$$

où J correspond à la relation entrée-sortie et f englobe les différentes contraintes inégalités telles que celles induites par les butées articulaires. Lorsque la tâche contraint m paramètres et que le système possède $n > m$ coordonnées généralisées, on se pose donc un problème de choix, ou d'optimisation, dans un ensemble fermé borné de dimension $(n - m)$. Celui-ci résulte de la *redondance* du système qui traduit le fait que le nombre de contraintes explicites dans l'espace opérationnel est inférieur au degré de liberté du système.

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la résolution de ce problème d'optimisation dans l'espace de dimension $(n - m)$ correspondant i.e. en faisant abstraction des contraintes inégalités. Ces solutions sont regroupées sous le terme de *modèle cinématique inverse*. Elles font appel aux techniques d'inversion généralisée des systèmes linéaires.

Dans la mesure où le problème tel qu'il est posé ci-dessus possède une infinité de solutions, nous sommes amenés à rechercher une solution optimale pour obtenir une posture réaliste. Cela indique qu'il est nécessaire de pondérer différentes quantités. Dans la formulation ci-dessus, les quantités opérationnelles sont fixées et on peut alors optimiser dans l'espace généralisé. La SVD nous renseigne également sur la capacité que possède le système à suivre la consigne imposée. Dans la mesure où la tâche opérationnelle n'est connue initialement que par sa valeur aux extrémités de chaque déplacement, la formulation ci-dessus (4.1) n'est qu'un choix de conception guidé, à la fois qualitativement et statistiquement, par nos mesures et la littérature du domaine.

Nous nous posons également la question de savoir comment déformer la consigne pour établir un compromis entre un mouvement efficace dans l'espace opérationnel et un mouvement efficace dans l'espace généralisé. La mesure de cette efficacité passera par l'étude de la relation entrée-sortie.

Ensuite, les différentes contraintes explicites peuvent être associées de manière globale dans un même critère pondéré mais il est possible de considérer que l'une d'entre elles peut avoir la priorité sur les autres. La logique de *pile de tâches* sera explorée dans le sens de la priorisation d'un ensemble de contraintes opérationnelles vis à vis des autres.

Enfin, les contraintes opérationnelles et les contraintes internes à la chaîne cinématique, y compris celles initialement traduites par des contraintes inégalités, peuvent toutes s'écrire, au moins localement, comme des ensembles de m contraintes linéaires sous la forme générale $A(\mathbf{q})_{m \times n} \delta\mathbf{q} = B$, où maintenant, m n'est

plus la dimension de l'espace opérationnel mais englobe les contraintes égalité et inégalités opérationnelles et internes. Nous pourrions donc étendre la résolution proposée à une série de tâches opérationnelles ou liées au respect de contraintes posturales.

4.2 Modèle cinématique inverse

Sous nos hypothèses, simuler le système revient à inverser la relation entrées-sorties que constitue le modèle cinématique général introduit au chapitre 2. Pour une configuration donnée, ce modèle est linéaire. Par conséquent, il s'agit d'inverser un système d'équations linéaires. Comme celui-ci met en relation des espaces de dimensions différentes, la matrice qui exprime la transformation n'est pas carrée. Nous faisons donc appel ici aux techniques d'inversion généralisée [Golub 83, Ben-Israel 03].

A partir de la relation entrées-sorties cinématique écrite au chapitre 2 : $\delta \mathbf{X} = J(\mathbf{q})\delta \mathbf{q}$, un modèle cinématique inverse consiste à écrire $\delta \mathbf{q} = A(\mathbf{q})\delta \mathbf{X}$, tel que :

$$J(\mathbf{q})\delta \mathbf{q} = J(\mathbf{q})A(\mathbf{q})\delta \mathbf{X} = \delta \mathbf{X}$$

Si $m < n$ et que le système est compatible, il suffit donc de trouver une inverse à droite de J . Soit $J^\#$ une inverse généralisée de dimension $(n \times m)$ de J qui vérifie par définition $JJ^\#J = J$. Nous choisissons d'écrire toutes les solutions du problème, lorsqu'il en existe, sous la forme :

$$\delta \mathbf{q} = J^\# \delta \mathbf{X} + (I_n - J^\# J) \mathbf{z} \quad (4.2)$$

où $(I_n - J^\# J)$ est l'opérateur de projection (ou *projecteur*) sur le noyau de J et \mathbf{z} est un vecteur arbitraire de dimension $(n \times 1)$. Pour $m < n$, nous pouvons supposer sans perte de généralité que $\text{rang}(J) = m$, $J^\#$ est une inverse à droite de J i.e vérifie $JJ^\# = I_m$.

4.2.1 Solutions de norme minimale, pseudo-inverse(s)

Parmi les solutions possibles, il est naturel de chercher à en définir une *meilleure*. Si toutes les variables ont la même importance en regard du problème à résoudre, on peut naturellement traduire cela comme la recherche d'une solution de norme euclidienne minimale.

Parmi toutes les inverses généralisées de J , on distingue la pseudo-inverse de Moore-Penrose J^+ qui est telle que la solution $\delta \mathbf{q}^+ = J^+ \delta \mathbf{X}$ est parmi toutes les solutions $\delta \mathbf{q}$ au problème 4.1 celle qui minimise la norme euclidienne :

$$\|\delta \mathbf{q}\|_E^2 = \sum_{i=1}^n \delta q_i^2 = \delta \mathbf{q}^T \delta \mathbf{q}$$

On montre en effet que $\delta \mathbf{q}^+$ est la solution du problème :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(\delta \mathbf{q}^T \delta \mathbf{q}) \\ \text{sous } \delta \mathbf{X} = J \delta \mathbf{q} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

Par ailleurs, la pseudo-inverse de Moore-Penrose vérifie les propriétés suivantes [Ben-Israel 03, Rotella 95] :

$$\left\{ \begin{array}{l} JJ^+J = J \\ J^+JJ^+ = J^+ \\ (JJ^+)^T = JJ^+ \\ (J^+J)^T = J^+J \end{array} \right. \quad (4.4)$$

En fonction des dimensions des espaces articulaire et opérationnel, on en déduit l'expression de la pseudo-inverse :

$$J^\# = \begin{cases} (J^T J)^{-1} J^T & \text{si } m > n \\ J^T (J J^T)^{-1} & \text{si } m < n \end{cases} \quad (4.5)$$

A partir de la décomposition en valeurs singulières présentée au chapitre 2, on montre que la pseudo-inverse de Moore-Penrose J^+ s'écrit dans le cas où $m < n$:

$$J^+ = J^T (J J^T)^{-1} = V \Sigma^{-1} U^T = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i} \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \quad (4.6)$$

La minimisation de la norme euclidienne n'a de signification physique que si les grandeurs considérées, en l'occurrence les δq_i ont le même coût pour le problème à régler. Nous pouvons cependant remplacer ce coût par tout autre coût qui conserve les propriétés du produit scalaire usuel. En effet, si on considère que le critère à minimiser est la somme pondérée positivement du carré des composantes de $\delta \mathbf{q}$ i.e :

$$\min(\sum_{i=1}^n w_i \delta q_i^2), \quad w_i > 0$$

On en revient alors à résoudre le problème :

$$\begin{cases} \min(\delta \mathbf{q}^T W \delta \mathbf{q}) \\ \text{sous } \delta \mathbf{X} = J \delta \mathbf{q} \end{cases} \quad (4.7)$$

où $W = \text{diag}(w_i^2)$ est une matrice diagonale définie positive de dimension $(n \times n)$. Le même principe de résolution fournit la solution :

$$\delta \mathbf{q}_w^+ = J_w^\# \delta \mathbf{X}$$

avec, pour les mêmes hypothèses concernant J ($m < n$ et $\text{rang}(J) = m$) :

$$J_w^+ = W^{-1} J^T (J W^{-1} J^T)^{-1}$$

La matrice J_w^+ est une inverse généralisée particulière, qu'on nommera pseudo-inverse W -pondérée. $\delta \mathbf{q}_w^+$ minimise la norme $\|\delta \mathbf{q}\|_w$ et la pseudo-inverse de Moore-Penrose correspond au cas particulier $W = I_n$. Cette généralisation de la notion de pseudo-inverse à des normes dont la pondération diffère de celle de la norme euclidienne sera particulièrement intéressante pour la génération de mouvements humains car dans ce domaine le déplacement des différentes liaisons peut être associé à des coûts différents.

4.2.2 Tâches prioritaires, contraintes explicites et implicites

L'ensemble des solutions décrit par l'équation 4.2 met en évidence la somme de deux termes. Ceci permet notamment de concilier les contraintes opérationnelles réalisées grâce au premier terme de la somme et d'autres contraintes implicites dans l'espace généralisé. On parle de manière classique de tâche principale dans l'espace opérationnel et de tâche secondaire dans l'espace généralisé. Cette dernière est réalisée dans le noyau de l'application qui décrit la tâche principale : elle ne modifie donc pas l'exécution de celle-ci mais n'est éventuellement réalisée qu'en partie [Arrichiello 09, Boulic 96, Nakamura 91]. La tâche secondaire permet de donner un objectif dans l'espace articulaire sans modification de la tâche principale grâce au projecteur $P = (I_n - J^\# J)$. Ce projecteur permet de se déplacer dans le noyau de la tâche principale et d'y choisir une solution.

$$\delta \mathbf{q} = \underbrace{J^\#(\mathbf{q}) \delta \mathbf{X}}_{\text{objectif principal}} + \underbrace{(I_n - J^\# J) \mathbf{z}}_{\text{objectif secondaire}} \quad (4.8)$$

La solution dépend directement du vecteur z . Ce vecteur est généralement obtenu comme le gradient d'une fonction que l'on souhaite minimiser. De cette manière, la tâche secondaire est réalisée au sens où le second terme de 4.8 permet de tendre localement vers le minimum de cette fonction. Cette construction a été notamment utilisée dans la littérature afin de réaliser :

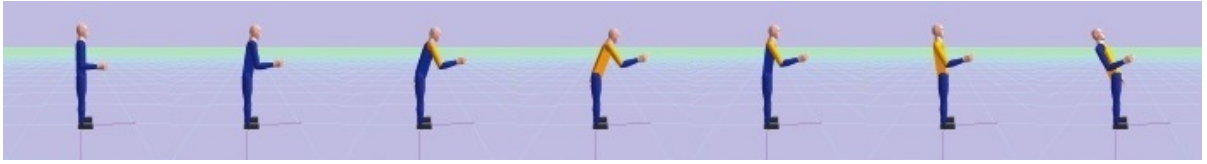
- l'évitement d'obstacle [Siciliano 91],
- l'évitement de butées articulaires [Liégeois 77, Chan 93],
- l'éloignement des postures singulières [Yoshikawa 84, Marchand 96, Liégeois 77],
- ou l'ajustement vers une posture particulière [Goussous 09].

Cette logique de priorisation de tâches a été explorée par de nombreux auteurs en robotique avec un nombre de tâches arbitraire et une cascade de priorités. Dans un premier temps, seules des contraintes égalité ont été considérées en généralisant la formule 4.8 à des compositions successives de projections. Plus récemment, la notion de *pile de tâches* a intégré naturellement les contraintes inégalités sans avoir recours à la résolution explicite par inversion généralisée [Boulic 96, Kanoun 09, Saab 11].

4.3 Pondération par l'inertie

La pseudo-inverse de Moore-Penrose fournit la solution qui minimise la somme quadratique des déplacements dans l'espace généralisé. Ce choix ne prend pas en compte les effets inertiels. Nous pouvons souhaiter pondérer en fonction de ces effets en imaginant, par exemple, que les masses les plus importantes seront moins mises en mouvement que les masses faibles si les corps considérés participent au même déplacement dans l'espace opérationnel. Nous pouvons illustrer cette idée en observant que le buste permet de produire des déplacements de la main mais qu'il est peu sollicité dans un certain nombre de cas, ce qui signifie que les articulations ne sont pas toutes sollicitées de la même façon. Cette caractéristique du mouvement humain peut se retranscrire dans le modèle cinématique en modifiant le coût des liaisons. Nous pouvons observer sur la figure (4.1) un mannequin qui est animé par des modèles avec et sans pondération.

Sans pondération :



Pondération indépendante de la posture :



Pondération par l'inertie :

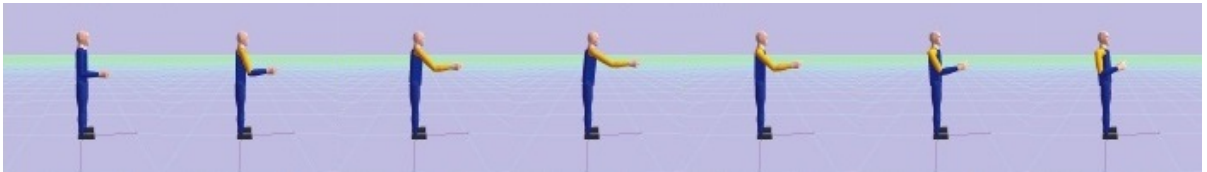


TABLE 4.1 – Comparaison entre des mouvements avec et sans pondération de l'action des liaisons.

Une solution classique¹ consiste à pondérer chaque incrément articulaire en fonction de l'inertie que voit chacune des liaisons. Suivant ce principe, le buste est soumis à l'inertie de plusieurs chaînes cinématiques et reçoit une pondération importante. En revanche, les articulations proches de l'organe terminal reçoivent une pondération faible.

La solution qui a été retenue consiste à calculer les inerties aux liaisons qui composent le mannequin par l'addition de deux termes suivants (théorème de Huygens) :

$$w_i = w_{1i} + w_{2i} \quad (4.9)$$

Le premier terme w_{1i} est défini par la relation $m.d^2$ dans laquelle m est la masse du corps considéré et d est la distance entre le point d'application de la masse du corps (centre de gravité du solide) et l'axe de la liaison considérée (figure 4.1).

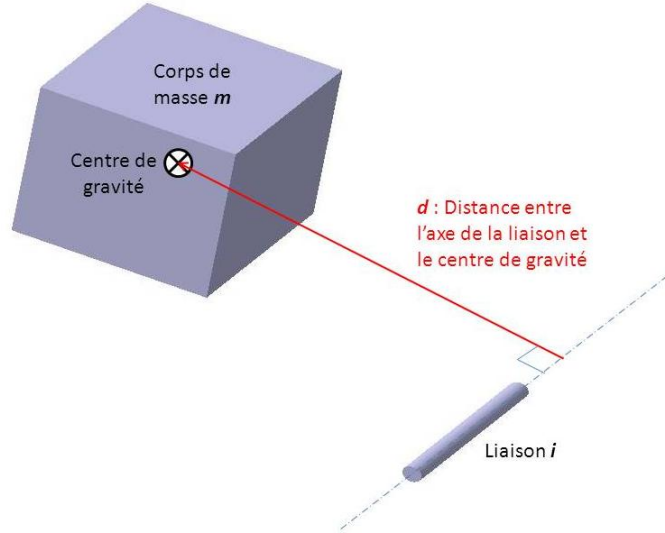


FIGURE 4.1 – Calcul de l'inertie d'un corps par rapport à une liaison.

Le second terme w_{2i} concerne le moment d'inertie induit par la répartition massique du corps considéré. Le calcul de celui-ci est effectué de façon itérative, en allant de l'organe terminal au buste. Prenons l'exemple de deux corps 1 et 2. Si nous notons O_1 le point d'application d'un moment d'inertie M_1 , le moment d'inertie M_2 au point O_2 se calcule par la relation 4.10, où R_{12} représente la matrice de rotation entre le premier et le deuxième corps :

$$M_2 = R_{12}^T \cdot M_1 \cdot R_{12} + I_2 \quad (4.10)$$

où I_2 représente la matrice d'inertie du corps 2 attaché au point O_2 . Notons que les matrices d'inertie des corps ne possèdent des termes que sur leur diagonale. Nous nous servons en effet des données issues de Jensen ([Jensen 78]) qui n'a mesuré que l'inertie des corps suivant les axes principaux.

L'ensemble des poids w_i donnés aux liaisons est encapsulé dans une matrice de pondération W , diagonale définie positive et de dimension n :

1. Différents arguments plaident en faveur de la pondération par la matrice d'inertie dans le schéma d'inversion. Nous nous intéressons ici à une approche "mécanicienne" de la pondération. On lira avec intérêt les travaux de Doty [Doty 92] concernant la pertinence de la métrique associée à ce choix.

$$W = \text{diag}(w_i) \quad (4.11)$$

4.4 Adaptation de la consigne opérationnelle : filtrage

A partir des données de la littérature et de nos mesures, il apparaît que certaines trajectoires opérationnelles sont proches de la ligne droite lorsque nous nous intéressons à la translation. Nous avons également pu observer lors de nos expériences que l'évolution de la rotation est également proche dans un certain nombre de cas des géodésiques de $SO(3)$. En ce sens, les géodésiques peuvent constituer un bon choix initial dans le cadre d'un schéma cinématique. Elles correspondent à un choix optimal dans l'espace opérationnel. Ces observations tendent à démontrer que la tâche est réalisée indépendamment du coût occasionné à la structure mécanique qui la réalise.

Néanmoins, différentes expérimentations donnent lieu à des écarts à ces géodésiques et nous nous intéressons ici à déformer la consigne opérationnelle en partant des géodésiques. La méthode retenue s'appuie sur le fait que la capacité à générer du déplacement opérationnel dépend de la configuration du système et de la direction à suivre. Par conséquent, le module du déplacement articulaire nécessaire pour réaliser telle ou telle consigne opérationnelle varie significativement comme l'indique la SVD de la relation entrée-sortie, ou modèle cinématique. Nous considérons que le mouvement va demeurer réaliste si le rapport $\delta\tilde{q}_i/\delta\tilde{X}_i$ du module du déplacement articulaire sur le module du déplacement opérationnel n'atteint pas des valeurs trop importantes. Cela revient à mettre en œuvre une stratégie qui privilégie les géodésiques dans l'espace opérationnel tant que celles-ci ne requièrent pas un déplacement articulaire trop important par comparaison à d'autres consignes opérationnelles.

Pour une posture donnée, le *ratio* des déplacements dans l'espace opérationnel et généralisé est directement décrit par la SVD. La SVD a déjà été utilisée en calcul numérique de manière à traiter, par la *régularisation*, les systèmes très faiblement conditionnés. Elle a été utilisée en robotique pour traiter de l'inversion des modèles cinématiques à proximité des configurations singulières qui correspondent également à un conditionnement très faible. Nous retrouvons également ces méthodes sous l'appellation *Damped Least Squares* dans la littérature.

Ici, nous détournons ces méthodes de leur usage habituel en les utilisant pour déformer nos consignes opérationnelles. Il est à noter que cela correspond à des cas de conditionnement dont les valeurs sont éloignées de celles observées au voisinage des configurations singulières et qui ne posent aucun problème de calcul numérique ou d'inversion.

4.4.1 Pseudo-inversion et valeurs singulières

La SVD fournit une représentation intrinsèque de la relation entrées-sorties qui extrait les directions principales et permet de diagonaliser l'application linéaire. A partir de cette décomposition, la pseudo-inverse de Moore-Penrose de la matrice jacobienne peut s'écrire (4.12).

$$J^+ = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i} \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \quad (4.12)$$

Si le modèle cinématique inverse choisi est $\delta\mathbf{q} = J^+ \delta\mathbf{X}$, on obtient alors la relation suivante :

$$\delta\tilde{q}_i = \frac{1}{\sigma_i} \delta\tilde{X}_i \quad i = 1, \dots, m \text{ et } \delta\tilde{q}_i = 0 \quad i = m+1, \dots, n \quad (4.13)$$

pour la paramétrisation de l'espace généralisé suivante :

$$\delta \tilde{q}_i = \mathbf{V}_i^T \delta \mathbf{q} \text{ et } \delta \tilde{X}_i = \mathbf{U}_i^T \delta \mathbf{X}$$

Nous constatons alors que lorsque σ_i est faible, une consigne $\delta \tilde{X}_i$ selon la direction \mathbf{U}_i entraîne une grande variation angulaire $\delta \tilde{q}_i$ selon la direction \mathbf{V}_i . Nous notons également que la pseudo-inverse engendre une solution pour laquelle les composantes dans le noyau de J sont nulles : c'est la conséquence du fait que nous construisons de cette manière une solution à norme minimale dans l'espace généralisé.

4.4.2 Régularisation

Si nous considérons une application linéaire mal conditionnée, rendant impossible son inversion ou sa pseudo-inversion et si nous rapportons cette situation à la SVD, cela correspond à l'existence d'une ou de plusieurs valeurs singulières très proches de zéro. Dans ce cadre, Tikhonov [Tikhonov 63] a introduit le principe de la *régularisation*, principe repris par [Albert 66] dans le cas de matrice de rang plein en ligne. Cette technique a été reprise plus tard par [Maciejewski 88, Maciejewski 90] pour l'utiliser dans le domaine de la robotique au voisinage des configurations singulières. Cette première méthode permet d'introduire un terme d'amortissement λ dans le calcul de la pseudo-inverse de la manière suivante :

$$J^+ = J^T (JJ^T + \lambda^2 I_m)^{-1} = \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \mathbf{V}_i \mathbf{U}_i^T \quad (4.14)$$

Le terme d'amortissement λ permet de rendre l'inversion moins sensible aux valeurs singulières très faibles au prix d'une erreur par rapport au système linéaire initial à résoudre. Cependant, cette méthode agit sur toutes les composantes de la même manière.

Cette méthode introduit une erreur dans la résolution du système linéaire. Il s'agit donc de ne la mettre en œuvre que lorsque les valeurs singulières passent sous un seuil significatif. La mise en œuvre de cette commutation d'un schéma de pseudo-inversion classique à l'introduction d'une erreur dans la résolution du système linéaire initial peut se faire de la manière indiquée sur le schéma 4.2 [Hue 08, Maciejewski 88]. La valeur de λ évolue entre 0 et λ_{max} en fonction de σ_{min} , la valeur singulière la plus faible.

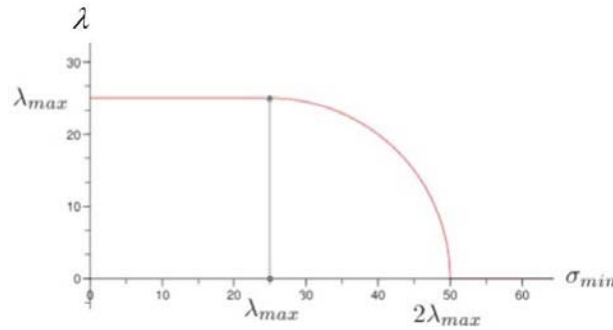


FIGURE 4.2 – Pilotage du filtre grâce au paramètre λ .

L'équation 4.15 associée s'écrit :

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{max} & \text{pour } \sigma_{min} < \lambda_{max} \\ \sqrt{\frac{\sigma_{min}}{\lambda - \sigma_{min}}} & \text{pour } \lambda_{max} < \sigma_{min} < 2\lambda_{max} \\ 0 & \text{pour } \sigma_{min} > 2\lambda_{max} \end{cases} \quad (4.15)$$

4.4.3 Filtrage

La méthode de filtrage consiste à ne modifier dans la somme (4.12) que les termes associés à la ou aux valeur(s) singulière(s) la (les) plus faible(s). Toute direction opérationnelle résultant de la composition de déplacements le long des directions \mathbf{U}_i , le filtrage s'emploie à pénaliser dans cette composition les composantes relatives aux valeurs singulières les plus faibles i.e. celles qui requièrent un fort ratio $\delta\tilde{q}_i/\delta\tilde{X}_i$, en laissant les autres composantes inchangées. Cela correspond donc à résoudre un système linéaire pour une consigne opérationnelle modifiée uniquement dans les directions les plus coûteuses en termes de déplacement articulaire.

L'inversion du modèle cinématique devient :

$$J_F^+ = J^T (JJ^T + F)^{-1} \quad (4.16)$$

avec :

$$F = \sum_{i=1}^m (\lambda_i^2 \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^T) \quad (4.17)$$

où les différents λ_i peuvent être réglés indépendamment en suivant le mode de calcul retenu pour le paramètre de régularisation λ . Le calcul de ce filtre revient donc à remplacer σ_{min} par σ_i dans l'équation (4.15) et à l'appliquer à tous les σ_i pour obtenir les différents λ_i à partir d'un même λ_{max} . Ainsi, les composantes correspondant aux k premières valeurs singulières seront conservées ($\lambda_i = 0; i = 1, \dots, k$) et celles correspondant aux $m - k$ dernières seront filtrées ($\lambda_i \neq 0; i = k + 1, \dots, m$); la valeur k dépendant du réglage retenu pour λ_{max} .

4.4.4 Pondération et filtrage du modèle cinématique

Nous avons vu précédemment que nous pouvons souhaiter modifier le coût associé à chaque liaison en choisissant une métrique pondérée dans l'espace généralisé. Cette pondération nous amène à considérer le filtrage d'une pseudo-inverse pondérée. L'adaptation du filtrage à ce cas de figure peut alors s'écrire :

$$J_{(W,F)}^+ = W^{-1} J^T \left(JW^{-1} J^T + \alpha \sum_{i=1}^m (\lambda_i^2 \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^T) \right)^{-1} = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^T + \alpha F)^{-1} \quad (4.18)$$

Cette équation fait apparaître un terme α . Les termes $JW^{-1} J^T$ et F ont en effet des ordres de grandeur différents. Le multiplicateur α vient donc mettre à l'échelle le terme de filtrage.

4.5 Priorisation ou pondération de critères

Les tâches données au système sont composées de plusieurs sous-tâches : déplacement des mains, placement du regard, etc. On peut imaginer que certaines de ces sous-tâches vont avoir la priorité sur d'autres. Nos acquisitions de mouvement ont également montré que les déplacements en orientation et position peuvent s'écarter des géodésiques. Une explication de ce phénomène peut consister à décrire l'exécution de ces tâches avec des niveaux de priorité différents : une tâche étant réalisée de manière optimale, et l'autre tâche étant réalisée avec les ressources laissées disponibles par la première. Différentes approches sont possibles : fixer un niveau de priorité égal pour toutes les sous-tâches, tenter de pondérer l'importance des sous-tâches ou encore établir une hiérarchie stricte entre sous-tâches. Ces notions sont explicitées sur un exemple qui illustre une situation où deux sous-tâches sont antagonistes.

Prenons l'exemple d'un humanoïde possédant deux bras illustré par le schéma (4.3 c). Nous demandons à cet avatar d'atteindre avec ses deux mains les points 1 et 2. Pour cela, notre tâche globale englobe les déplacements vers 1 et 2 (4.19) et les sous-tâches s'écrivent : $\delta\mathbf{X}_1 = J_1\delta\mathbf{q}$ et $\delta\mathbf{X}_2 = J_2\delta\mathbf{q}$.

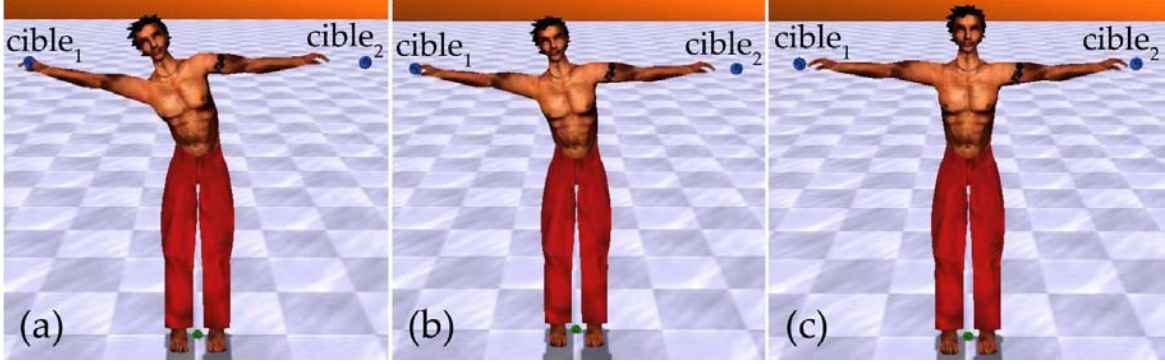


FIGURE 4.3 – [Kulpa 05] Ensemble des solutions fournies par a) un schéma priorisé, b) un schéma global pondéré et c) un schéma global classique.

4.5.1 Les schémas de pseudo-inversion

Si nous regroupons ces deux sous tâches dans un modèle entrée-sortie global $\delta\mathbf{X} = J_{global}\delta\mathbf{q}$ (équation 4.19), la résolution par la pseudo-inverse de Moore-Penrose minimise la norme euclidienne de $(\delta\mathbf{X} - J_{global}\delta\mathbf{q})$. Ici, les deux tâches ne sont pas réalisables simultanément. L'erreur est donc non-nulle et cette méthode tend à fournir ici une valeur égale pour l'écart à chacune des sous-tâches (figure 4.3 c).

$$\delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \delta\mathbf{X}_1 \\ \delta\mathbf{X}_2 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad J_{global} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Il est également possible de décider de pondérer les tâches et de minimiser via une pseudo-inverse pondérée une norme qui s'écrit : $\mu\|\delta\mathbf{X}_1 - J_1\delta\mathbf{q}\| + \gamma\|\delta\mathbf{X}_2 - J_2\delta\mathbf{q}\|$. Dans de tels cas [Mansard 07], le schéma d'inversion permet de favoriser une sous-tâche comme illustré sur la figure 4.3 b). L'action sur les poids μ et γ permet de favoriser une sous-tâche mais tant que ces poids sont finis et non nuls, les sous-tâches correspondantes influent sur la solution : on atteint un compromis.

On peut souhaiter séquencer la résolution par priorité successives. Si ici, il est primordial d'atteindre la cible 1 et secondaire d'atteindre la seconde, alors il est préférable de choisir un schéma de résolution qui établit des priorités strictes. On peut rapprocher cette approche de la précédente dans le cas limite où le poids donné à α serait infiniment plus grand que le poids associé à β . Dans cet exemple, les degrés de liberté permettent d'atteindre la cible 1 (figure 4.3 a). On ne cherche ensuite à minimiser la distance à la cible 2 qu'à la condition de ne pas dégrader la performance sur la cible 1. Les méthodes de type "pile de tâches" permettent de mettre en œuvre cette stratégie et de satisfaire pleinement *quelques* tâches plutôt que de trouver un compromis. Ce système de priorisation est régulièrement utilisé dans des applications de robotique [Mansard 05, Mansard 07, Siciliano 91].

4.5.2 Formulation de la pile de tâche

Le résultat de la pile de tâche s'effectue de façon itérative. La résolution de la première sous-tâche n'est soumise à aucune contrainte liée aux autres tâches. Ensuite, chacune des sous-tâches de priorité

moindre ne peut être réalisée que dans la mesure où elle ne modifie pas l'erreur sur les tâches de priorité supérieure. En terme de résolution de systèmes linéaires, les tâches de priorité moindre sont exécutées dans le noyau des applications qui décrivent les sous-tâches de priorité plus élevée. Cette approche a d'abord été développée avec deux tâches : une tâche prioritaire puis une tâche secondaire [Liégeois 77]. Elle a ensuite été généralisée à un nombre de priorités quelconque [Boulic 96, Baerlocher 01]. A chaque itération, la valeur du déplacement articulaire $\delta \mathbf{q}$ est augmentée d'une contribution $\delta \mathbf{q}^k$ qui appartient au noyau des tâches d'indice strictement inférieur à k . Ce vecteur est obtenu par projection sur le noyau à l'aide du projecteur P_k associé à cette étape de résolution.

La table 4.2 décrit l'algorithme issu de [Kanoun 09] qui permet de calculer de façon récursive une pile de sous-tâches.

$P_0 \leftarrow I_n$
$\delta \mathbf{q} \leftarrow 0_n$
pour k allant de 1 à l , faire
Calculer J_k
Calculer $\delta \mathbf{x}^k$
$\hat{J}_k \leftarrow J_k P_{k-1}$
Calculer $\hat{J}_k^\#$
$\delta \mathbf{q}^k \leftarrow \hat{J}_k^\# (\delta \mathbf{x}^k - J_k \delta \mathbf{q}^{k-1})$
$\delta \mathbf{q} \leftarrow \delta \mathbf{q} + \delta \mathbf{q}^k$
$P_k \leftarrow P_k - \hat{J}_k^\# \hat{J}_k$
fin pour

TABLE 4.2 – Algorithme de calcul d'une pile de l tâches.

Notons que la pseudo-inversion dans l'algorithme (4.2) ne prend pas seulement en compte la matrice jacobienne liée à la sous-tâche mais également le projecteur lié à l'ensemble des sous-tâches précédentes. La solution fournie par le système minimise à chaque étape à la fois le déplacement dans l'espace généralisé au sens des moindres carrés ainsi que l'erreur de positionnement dans l'espace de la tâche.

L'utilisation d'une pile de tâches permet de considérer leur exécution et par conséquent d'agir sur leur réglage séparément. Cette modification du calcul comporte certaines difficultés. Celles-ci sont liées à la façon d'ajouter de nouvelles sous-tâches dans la pile, au terme de filtrage et à la pondération des liaisons. Nous étudions ces trois difficultés au travers des paragraphes suivants. Notons également que les valeurs singulières lors de la pseudo-inversion ne reflètent plus la seule mobilité de la chaîne mais tiennent compte également des contraintes liées aux sous-tâches précédentes.

4.5.3 Formulation générale du problème

La solution fournie par une pile de tâches classique minimise la somme du carré des déplacements dans l'espace articulaire. Cette technique peut-être adaptée afin de respecter la minimisation d'une norme pondérée en incluant au système de priorisation une matrice de pondération W . La pondération de ce système de priorisation permet d'intégrer la masse des corps au calcul de la solution, permettant ainsi de reproduire les effets dynamiques liés aux inerties de la chaîne.

Il est également possible d'inclure la notion de filtrage. Grâce à la formulation par pile de tâches, le filtrage peut s'appliquer séparément sur chacune des tâches. Le terme de filtrage s'ajoute au niveau de la pseudo-inversion de la matrice jacobienne de la manière suivante :

$$(PJ)_{W,F}^+ = W^{-1} (PJ)^T \left((PJ) W^{-1} (PJ)^T + \alpha F \right)^{-1} \quad (4.20)$$

où il est important de noter que le terme de filtrage ne prend plus en compte uniquement la matrice jacobienne de la tâche considérée indépendamment mais le couple (matrice jacobienne de la tâche, projecteur des sous-tâches précédentes). L'algorithme de la pile de tâche permettant de trouver une solution pondérée et filtrée est présenté dans le tableau (4.3).

$P_0 \leftarrow I_n$
$\delta \mathbf{q} \leftarrow 0_n$
pour k allant de 1 à l , faire
Calculer J_k
Calculer $\delta \mathbf{x}^k$
$\hat{J}_k \leftarrow J_k P_{k-1}$
Calculer $J_{W,F,k}^\#$
$\delta \mathbf{q}^k \leftarrow J_{W,F,k}^\# (\delta \mathbf{x}^k - J_k \delta \mathbf{q}^{k-1})$
$\delta \mathbf{q} \leftarrow \delta \mathbf{q} + \delta \mathbf{q}^k$
$P_k \leftarrow P_k - J_{W,k}^\# \hat{J}_k$
fin pour

TABLE 4.3 – Algorithme de calcul d'une pile de l tâches pondérées et filtrées.

4.6 Calcul des consignes

Cette section présente la façon dont sont calculées les différentes consignes que nous souhaitons donner au système de priorisation. Nous allons étudier le calcul des consignes de la main, du regard, du respect des butées, de l'évitement d'auto-collision et d'un gradient permettant de simuler la gestuelle humaine tout en tenant compte des contraintes temporelles du mouvement. Voici ci-dessous les différentes sous-tâches que nous rencontrons dans notre système de priorisation :

- Translation de la main (contraintes égalités),
- Rotation de la main (contraintes égalités),
- Rotation du regard (contraintes égalités),
- Respect des butées articulaires (contraintes inégalités),
- Respect de contraintes d'auto-collision (contraintes inégalités),
- Ajustement vers une posture de confort ou de référence (gradient).

4.6.1 Consignes liées à la main

Les consignes spatiales liées aux mains sont les géodésiques de \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Le principe de l'interpolation est unique mais est adapté à l'espace considéré.

4.6.1.1 Aspects temporels

La prédiction de la durée du mouvement est réalisée grâce à la méthode MTM [MTM 96]. Celle-ci permet de calculer un temps de trajet comme une fonction de la distance que doit parcourir la main pour un mouvement de translation. Elle permet aussi de calculer un temps en fonction de l'amplitude de rotation lorsque l'on considère les rotations de la main. Cette durée est calculée indépendamment entre la translation et la rotation de la main. En faisant l'hypothèse de mouvements combinés, nous retenons la plus longue de ces deux durées pour effectuer notre prédiction.

Chaque séquence est échantillonnée et nous sommes amenés à considérer les incréments $\delta \mathbf{X}^k$ à chaque mouvement. Pour des raisons de simplicité, cet échantillonnage temporel est réalisé à 60 Hz, à la fréquence d'acquisition du système de capture de mouvement du laboratoire.

Sur la géodésique, la loi temporelle $s(t)$ retenue est celle du minimum jerk. Dans la mesure où les trajectoires peuvent s'écarter des géodésiques notamment en raison du filtrage, cette loi doit être recalculée à chaque nouvelle géodésique. Le calcul de la consigne en position se fait donc de façon itérative, en boucle fermée à partir de la position actuelle de la main. La figure 4.4 illustre ce calcul entre une situation initiale \mathbf{X}^0 et une situation finale \mathbf{X}^f . Sur cette illustration, la main ne suit pas la trajectoire géodésique entre X^0 et X^f . Le point X^i n'est pas sur la géodésique initialement calculée (4.4 a). Nous devons alors calculer la géodésique entre le point actuel X^i et le point final X^f (4.4 b).

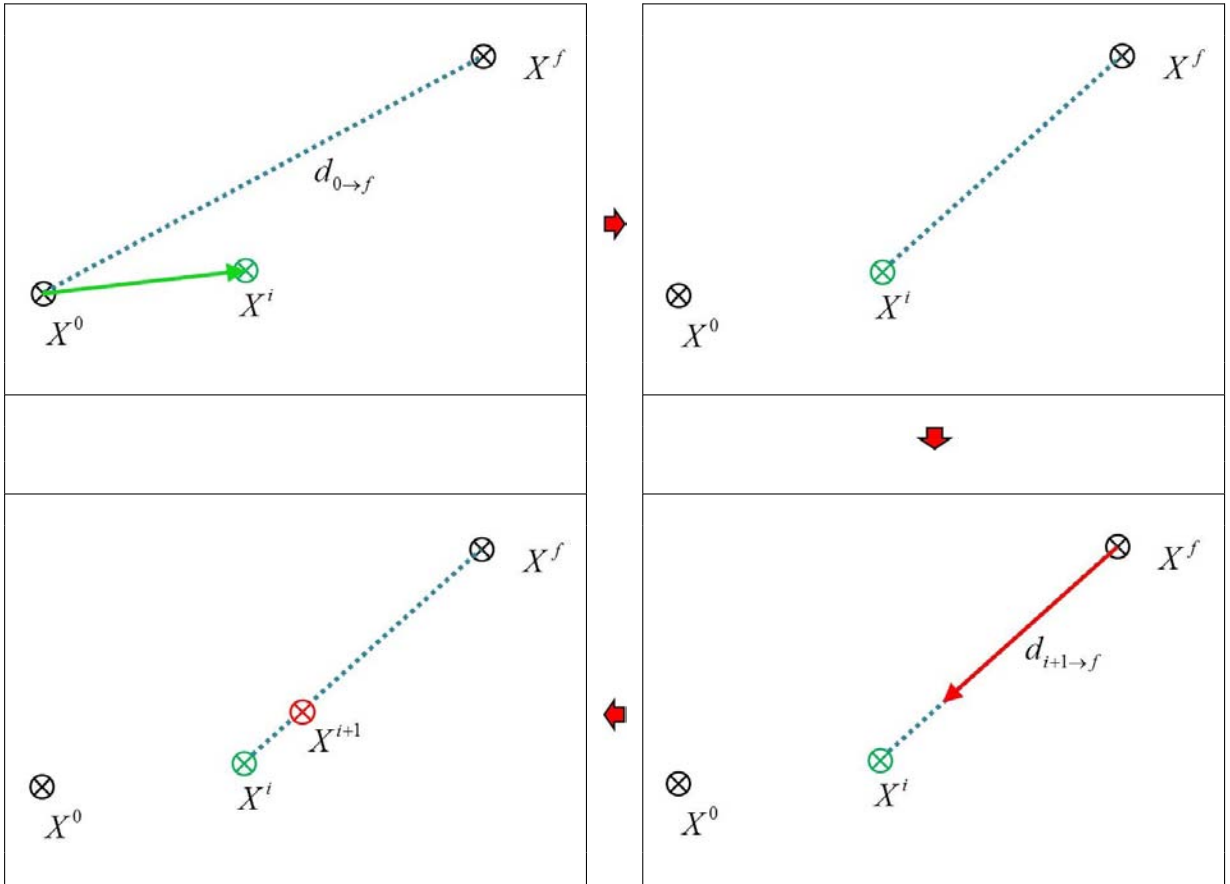


FIGURE 4.4 – Schéma décrivant la procédure de calcul du point $i + 1$.

Notons $d_{i \rightarrow f}$ la distance sur la géodésique entre \mathbf{X}^i et le point final X^f et $d_{0 \rightarrow f}$ la distance entre le point initial et le point final. Grâce à la loi temporelle $(1 - s(t))$, bornée entre 0 et 1 et dont le profil est donné sur le schéma 4.5, nous pouvons exprimer la distance à laquelle doit se trouver le point \mathbf{X}^{i+1} du point X^f par la formule suivante :

$$\begin{aligned} \frac{d_{i+1 \rightarrow f}}{d_{0 \rightarrow f}} &= 1 - s(i + 1) \\ d_{i+1 \rightarrow f} &= (1 - s(i + 1)) d_{0 \rightarrow f} \end{aligned} \quad (4.21)$$

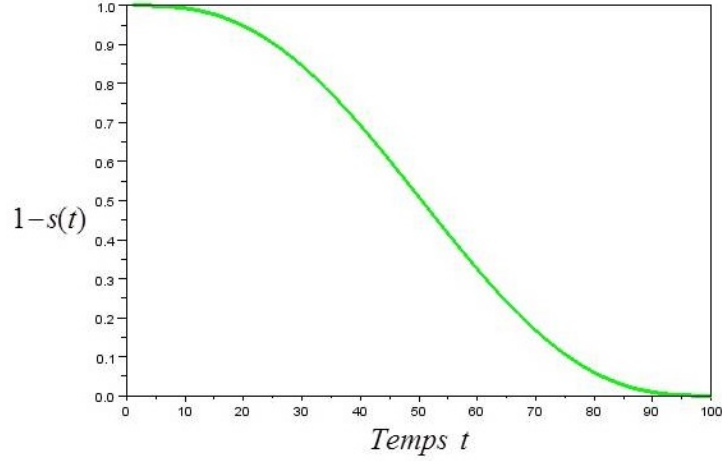


FIGURE 4.5 – Tracé du profil temporel inversé.

Sur la figure 4.4 c), nous reportons la distance restant à parcourir sur la nouvelle géodésique. La valeur de \mathbf{X}^{i+1} est ensuite calculée par interpolation comme l'illustre la figure 4.4 d) et le ratio nécessaire à l'interpolation est donné par :

$$\rho = 1 - \left(\frac{d_{i+1 \rightarrow f}}{d_{i \rightarrow f}} \right) \quad (4.22)$$

Finalement, la consigne en translation $\delta \mathbf{X}^i$ est donnée par la relation :

$$\delta \mathbf{X}^i = \mathbf{X}^{i+1} - \mathbf{X}^i \quad (4.23)$$

Ce calcul est mené de manière similaire dans les deux espaces \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Le traitement est direct pour la translation et est mené avec les coordonnées cartésiennes. L'interpolation est linéaire. Pour la rotation, la saisie est réalisée à l'aide des angles d'Euler sur le logiciel OLARGE. Ces données sont transformées en quaternions puis les calculs sont menés grâce à l'interpolation linéaire sphérique (2.5.2.2.b) ou de manière équivalente par interpolation linéaire sur la représentation (axe, angle).

4.6.2 Consignes liées au regard

La stratégie de placement du regard que nous avons adoptée est issue de Straumann *et al* [Straumann 91]. Elle consiste à suivre du regard la main opérante en agissant sur l'orientation de la tête (stratégie observée sur cinq sujets dans [Straumann 91]). Les consignes que nous donnons au système sont calculées de la même façon que pour les consignes en rotation de la main. Cependant, la différence se situe au niveau du calcul de l'orientation à atteindre.

Nous avons une cible définie par la position \mathbf{X}_p de la main. Afin de suivre la cible avec le regard, nous allons à chaque incrément de calcul, construire l'orientation de la tête en fonction de cette cible. Nous connaissons la position de la tête et de la main opérante (main que nous désirons suivre). A partir de la position de ces deux corps, nous pouvons générer un vecteur unitaire \vec{d} qui pointe de la tête vers la cible :

$$\vec{d} = \frac{1}{\|\mathbf{X}_{main} - \mathbf{X}_{tête}\|} [\mathbf{X}_{main} - \mathbf{X}_{tête}] \quad (4.24)$$

La stratégie retenue revient à aligner l'axe \vec{y} de la tête avec le vecteur \vec{d} calculé précédemment tout en contraignant l'axe \vec{x} pour qu'il reste dans le plan horizontal. Nous utilisons un système de deux angles pour créer l'orientation que doit avoir la tête pour suivre la cible, cette orientation étant représentée par un quaternion que nous appelons H_{regard} . Les schémas 4.6 a) et b) illustrent les angles d'azimut et d'élévation que nous calculons par les formules 4.25 et 4.26.

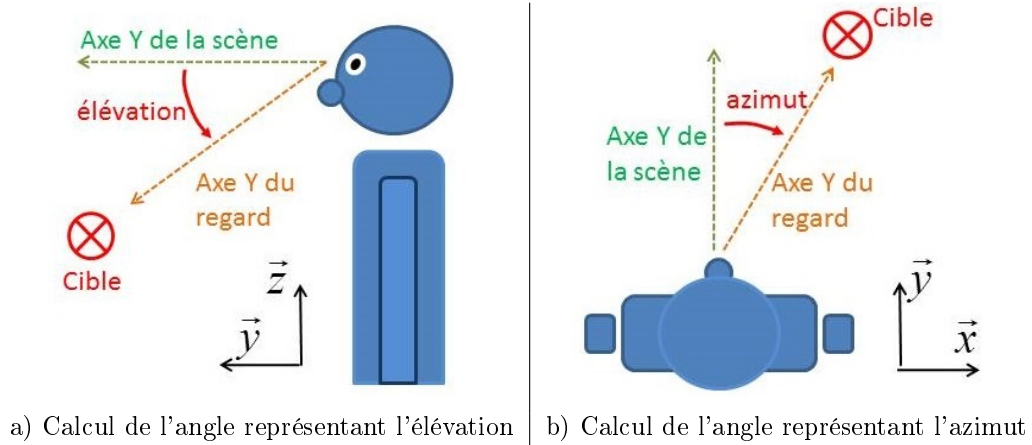


FIGURE 4.6 – Définition des angles d'élévation et d'azimut.

$$\text{élévation} = \text{atan} \left(\vec{d}_z, \sqrt{(\vec{d}_x)^2 + (\vec{d}_y)^2} \right) \quad (4.25)$$

$$\text{azimut} = \text{atan} \left(\vec{d}_x, \vec{d}_y \right) \quad (4.26)$$

Une fois les angles d'élévation et d'azimut calculés, le quaternion H_{regard} qui va représenter l'orientation que doit prendre la tête pour suivre la cible est calculé à partir de la multiplication de deux quaternions simples liés à chacune des rotations élémentaires. Ensuite, l'interpolation est menée de la même manière que pour la rotation des mains.

$$H_{regard} = H_{azimut} \cdot H_{élévation} \quad (4.27)$$

4.6.3 Respect des amplitudes articulaires

4.6.3.1 Principe général

Nous reprenons ici des techniques utilisées en robotique. Les robots sont des systèmes mécaniques soumis à certaines contraintes et notamment au respect de l'amplitude articulaire de leurs liaisons. Ces amplitudes sont délimitées par des butées hautes et basses. Il existe dans la littérature des solutions qui permettent ou tentent d'éviter de dépasser ces butées. Nous pouvons citer trois méthodes qui sont :

- l'utilisation d'un gradient dans l'espace articulaire [Marchand 96, Chaumette 01, Robin 07],
- la pondération variable du coût associé au déplacement de certaines liaisons [Chan 93],
- l'ajout de contraintes inégalités dans la pile de tâche [Mansard 05, Mansard 07].

Méthodes de gradient de potentiels répulsifs Plusieurs méthodes qui utilisent des gradients de potentiels répulsifs ont été successivement définies [Liégeois 77, Zghal 90, Marchand 96, Chaumette 01, Robin 07]. Elles consistent à construire, pour chaque liaison, un potentiel répulsif aux abords de chaque butée articulaire et à descendre le gradient de ce potentiel. Ces méthodes se nomment “Gradient Projection method” (GPN). La forme classique de ce potentiel \mathcal{P} s’écrit :

$$\begin{aligned} \text{si } q_i < q_{i,\text{moyen}} \quad \mathcal{P}(q)_i &= \frac{\beta}{(q_{i,\text{min}} - q_i)^2} \\ \text{si } q_i > q_{i,\text{moyen}} \quad \mathcal{P}(q)_i &= \frac{\beta}{(q_{i,\text{max}} - q_i)^2} \end{aligned} \quad (4.28)$$

avec $q_{i,\text{moyen}} = (q_{i,\text{min}} + q_{i,\text{max}})/2$, $q_{i,\text{min}}$ et $q_{i,\text{max}}$ représentant les butées articulaires d’une liaison i . Cette formulation fait intervenir une division, laquelle interdit à la liaison de se trouver sur la butée même. La figure (4.7) représente le puits de potentiel et les directions asymptotiques ($q_{i,\text{min}} = -90^\circ$) et ($q_{i,\text{max}} = 90^\circ$) associées aux butées haute et basse de la liaison.

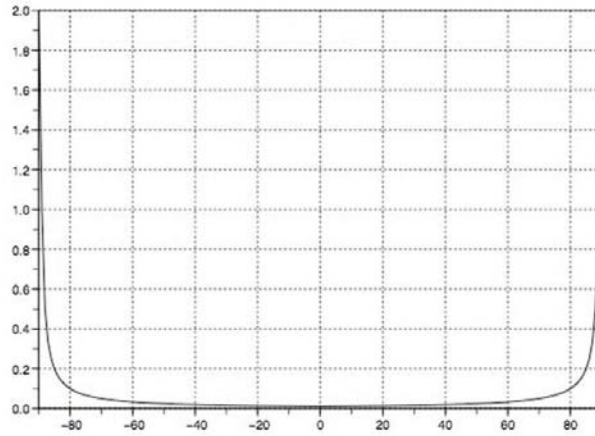


FIGURE 4.7 – Exemple d’un puits de potentiel répulsif.

Dans une formulation de type “pile de tâches”, le gradient de ce potentiel est projeté dans le noyau de l’application linéaire associée aux tâches de priorité supérieure. Par conséquent, la descente de gradient n’est réalisée qu’à la condition que les tâches de priorité supérieure le permettent. Ainsi, la priorité est donnée aux tâches opérationnelles plutôt qu’à l’évitement de butée et ce dernier n’est en aucun cas garanti.

Modification du coût des liaisons Une façon alternative pour éviter les butées est décrite dans Chan *et al* ([Chan 93]) et se nomme “Weighted least norm” (WLN). Elle utilise une pondération variable W des déplacements articulaires dans le calcul de la pseudo-inverse pondérée à partir de la distance aux butées. Le calcul du poids associé à chacune des liaisons est donné dans les formules :

$$\begin{aligned} \text{si } \frac{\partial \mathcal{P}(q)}{\partial q_i} > 0 \quad w_i &= 1 + \frac{\partial \mathcal{P}(q)}{\partial q_i} \\ \text{si } \frac{\partial \mathcal{P}(q)}{\partial q_i} \leq 0 \quad w_i &= 1 \end{aligned} \quad (4.29)$$

avec

$$\frac{\partial \mathcal{P}(q)}{\partial q_i} = \frac{(q_{\text{max}_i} - q_{\text{min}_i})^2 (2q_i - q_{\text{max}_i} - q_{\text{min}_i})}{4(q_{\text{max}_i} - q_i)^2 (q_i - q_{\text{min}_i})^2}$$

et où les w_i sont les termes diagonaux de la matrice diagonale W .

En modifiant le coût associé à chacune des liaisons en fonction de la proximité des butées, nous modifions la solution de notre système. Les liaisons éloignées des butées vont se déplacer plus facilement que les autres. Cette solution possède ses limites. Par exemple, si l'ensemble des liaisons qui composent le système se trouve à proximité des butées articulaires, alors les coûts associés aux liaisons vont devenir sensiblement les mêmes et par conséquent, la solution fournie par cette méthode ne permettra plus l'évitement des butées. Dans ce cas, cette technique conduit le système à trouver une solution analogue à celle obtenue avec un système sans pondération.

Cependant, nous utilisons déjà une matrice de pondération pour le déplacement du mannequin, celle-ci dépendant des masses et inerties de chaque corps. Par conséquent, nous n'allons pas utiliser cette méthode pour l'évitement de butée.

Contraintes inégalités A partir de la littérature [Chaumette 01, Mansard 05, Mansard 07], il est possible de générer des sous-tâches d'évitement de butées en respectant strictement les contraintes inégalités. L'activation de ces tâches se réalise suivant des critères qui peuvent être de plusieurs natures.

Le modèle cinématique avec système de priorisation fournit à chaque pas de temps un certain incrément articulaire δq_i sur chacune des liaisons. On définit la distance à la butée significative à partir du sens de déplacement de la manière suivante :

$$\text{distance butée} = \begin{cases} q_i - q_{i,\min} & \text{si } \delta q_i < 0 \\ q_{i,\max} - q_i & \text{si } \delta q_i > 0 \end{cases} \quad (4.30)$$

Lorsque la liaison se rapproche trop près de la butée, nous allons limiter l'incrément articulaire. Nous définissons un incrément articulaire maximum noté $(\delta q_{i,\max})$ qui équivaut à une fraction de la distance à la butée. La fraction expérimentale retenue est 1/5 (équation 4.31). Cette dernière a été choisie à cette valeur-ci pour ne pas que la contrainte d'évitement de butée soit trop souvent active.

$$\delta q_{i,\max} = \frac{\text{distance butée}}{5} \quad (4.31)$$

Dès lors qu'un incrément articulaire dépasse cet incrément maximal, nous ajoutons une contrainte égalité dans notre système de priorisation et recalculons un nouveau résultat. Nous avons donc transformé une contrainte inégalité en contrainte égalité dans la zone proche des butées. La table 4.4 illustre l'algorithme qui teste l'activation de cette sous-tâche et qui ajoute des contraintes supplémentaires lorsque c'est nécessaire dans le schéma de génération de mouvements.

Si une contrainte d'évitement de butée s'active, une nouvelle sous-tâche est générée qui va être représentée par sa matrice Jacobienne et sa consigne $\delta \mathbf{X}$. La matrice jacobienne relative à cette nouvelle sous-tâche pour la $i^{\text{ème}}$ liaison est représentée par :

$$J_{\text{butée},i} = [0, 0, \dots, 1, \dots, 0, 0] \quad (4.32)$$

La consigne $\delta \mathbf{X}$ associée à cette sous-tâche est la valeur de l'incrément articulaire $(\delta q_{i,\max})$ associé à cette liaison.

4.6.4 Contrainte d'auto-collision

L'auto-collision est le contact entre deux corps appartenant à un même système. Il existe différentes façons de prendre en compte les phénomènes d'auto-collision. Cependant, ces méthodes sont, en règle générale, très consommatrices en temps de calcul, en particulier lorsque un grand nombre d'objets est à


```

Sous-tâche-butée =  $\emptyset$ 
Nouvel-ajout-de-contrainte = VRAI
 $\delta x$  = Calcul des consignes de déplacement
Tant que (Nouvel-ajout-de-contrainte == VRAI)
{
  Nouvel-ajout-de-contrainte = FAUX
   $\delta q$  = Calcul de la nouvelle solution
  Pour  $i$  allant de 1 à  $n$ 
  {
    Si ( $\delta q_i < 0$ )
    {
      distance-butée =  $q_i - q_{i,min}$ 
    }
    Sinon
    {
      distance-butée =  $q_{i,max} - q_i$ 
    }

    Si ( $\|\delta q_i\| > \delta q_{i,max}$ )
    {
      Ajout de la contrainte dans (Sous-tâche-butée)
      Nouvel-ajout-de-contrainte = VRAI
    }
  }
}

```

TABLE 4.4 – Algorithme permettant le calcul et l'intégration de la contrainte d'évitement des butées articulaires.

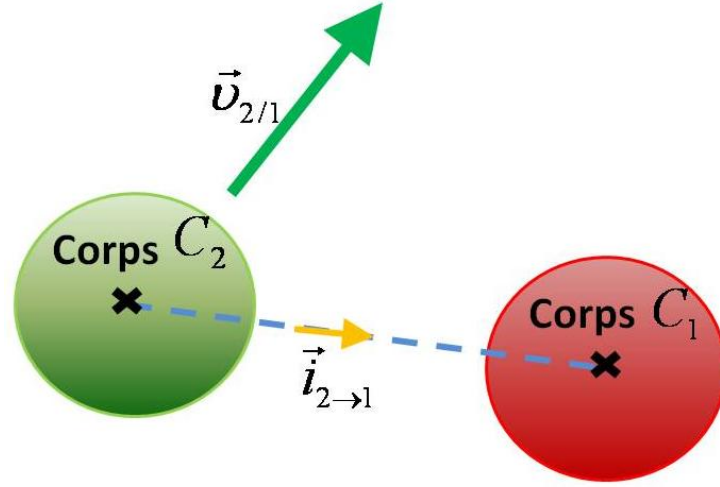
prendre en compte [Yoon 04]. Des méthodes permettent de réduire ces calculs comme la simplification² ou la modification de la géométrie des objets, par exemple pour la descente de gradients de distance entre deux entités [Escande 08]. Dans l'article [Kuffner 02], les auteurs expliquent qu'il n'est pas nécessaire de calculer des contraintes d'auto-collision entre tous les corps. Dans notre cas, le coude ne pourra jamais toucher l'épaule ni le poignet du fait de la géométrie de notre humanoïde. De ce fait, nous pouvons réduire les calculs associés à cette sous-tâche afin de simplifier l'algorithme général.

L'évitement de l'auto-collision est pris en compte en tant que contrainte inégalité. Le pilotage et le mode de fonctionnement de cette sous-tâche sont proches de ceux utilisés pour l'évitement de butée. Le calcul correspondant est illustré sur la figure 4.8.

Prenons deux corps notés C_1 et C_2 et notons par $v_{2/1}$ la vitesse du corps 2 par rapport au corps 1. La distance séparant ces deux corps est notée $d_{2,1}$. Le vecteur unitaire $\vec{i}_{2 \rightarrow 1}$ pointe vers le centre du corps C_1 à partir du centre de C_2 .

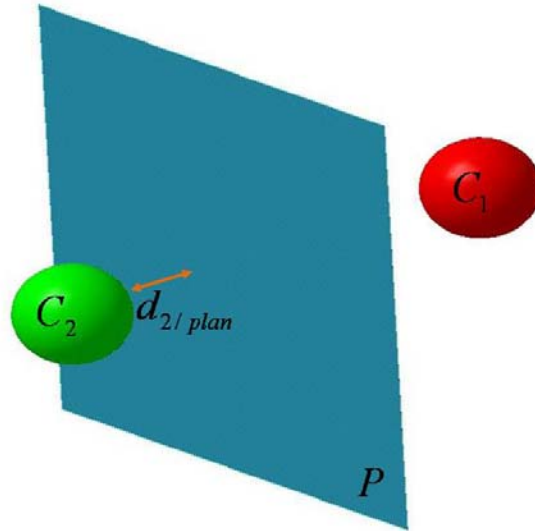
De manière semblable à celle utilisée pour l'évitement de butées, la vitesse relative de chacun des corps est limitée lorsque ceux-ci sont proches et que leur distance diminue. Cette restriction de vitesse ne va s'appliquer que dans la direction $\vec{i}_{2 \rightarrow 1}$ et produit une contrainte égalité supplémentaire. Notons $v_{collision,2/1}$ la projection de la vitesse $v_{2/1}$ dans la direction $\vec{i}_{2 \rightarrow 1}$. Si cette vitesse relative est supérieure à la limite maximale ($v_{collision,2/1} > v_{max,2/1}$), alors une sous-tâche d'évitement de butée est activée et la vitesse $v_{collision,2/1}$ est limitée. La vitesse maximale admissible est calculée en fonction de la distance

2. Notons qu'il existe également des méthodes qui permettent de travailler avec des modèles plus complets qui prennent en compte la déformation des corps [Spillmann 06].

FIGURE 4.8 – Schéma illustrant le traitement de l'auto-collision avec deux corps C_1 et C_2

entre les deux corps (la fraction retenue expérimentalement est $1/5$). Nous associons à celle-ci une matrice Jacobienne particulière $J_{2/1}$ qui caractérise le mouvement relatif de ces deux corps.

Etant donné que nous ne fixons qu'une contrainte supplémentaire à notre mannequin, celui-ci conserve des possibilités de déplacement entre les deux corps considérés. Le schéma 4.9 permet d'illustrer l'espace des solutions et les déplacements possibles de C_2 par rapport à C_1 dans le plan P . Ce dernier étant perpendiculaire à $\vec{i}_{2 \rightarrow 1}$ lorsque cette contrainte est active. Dans un système de priorisation, l'espace des solutions représenté par P est contenu dans le noyau de la sous-tâche d'évitement de l'auto-collision.

FIGURE 4.9 – Illustration des solutions possibles fournies par le noyau de la sous-tâche d'évitement d'auto-collision. Ces déplacements relatifs possibles entre les deux deux corps sont représentés par le plan P .

Remarque : L'adjonction d'une contrainte supplémentaire modifie la solution fournie par le système. Il est donc nécessaire de contrôler à nouveau la solution obtenue afin d'assurer que le nouveau mouvement produit respecte également l'évitement d'autocollision pour l'ensemble des corps restants.

4.6.5 Ajustement vers une posture de référence

L'ajustement vers différentes postures de référence fait partie des tâches implicites nécessitant la coordination posturale que nous pouvons souhaiter modéliser. Afin de générer un mouvement réaliste, nous pouvons choisir de rester à proximité d'une posture de référence. C'est le cas des travaux de Goussous *et al* [Goussous 09] qui réalisent des mouvements basés sur la prise de pièce et qui recherchent parmi les solutions possibles, celle qui minimise la distance entre la posture du mannequin et une posture de référence.

Nous avons choisi de représenter une attitude humaine (se tenir droit par exemple) par une tâche qui permet à l'humanoïde de s'ajuster vers une posture de référence ou de confort. Nous avons vu dans le chapitre 2 qu'il existe des zones posturales préférentielles pour l'humain. Ces zones préférentielles dépendent uniquement des positions de chaque articulation. Afin de conserver cette qualité, nous allons intégrer une nouvelle sous-tâche à notre modèle. Celle-ci se trouve dans l'espace généralisé et va, parmi les solutions restantes du problème, chercher celle qui empêche l'humanoïde de s'éloigner d'une posture de référence.

Cette sous-tâche est représentée par un gradient noté z comme le montre le schéma 4.10. La formule 4.33 permet le calcul de ce gradient pour chaque articulation en fonction de sa position préférentielle, de ses butées minimales et maximales.

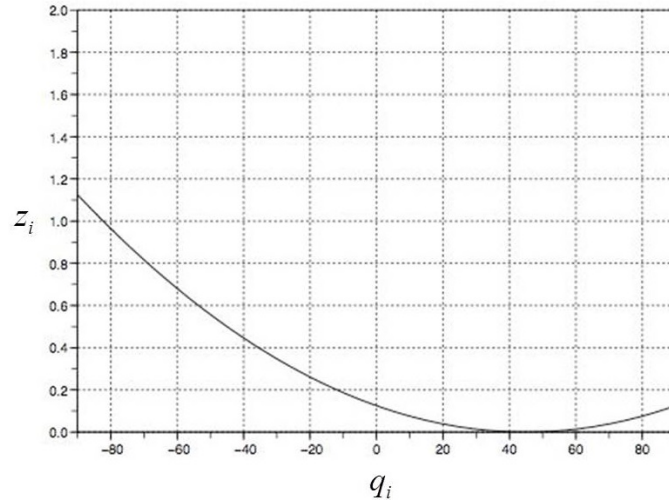


FIGURE 4.10 – Exemple d'un gradient d'ajustement vers une posture de confort pour une articulation.

$$z_i = \frac{-2\beta (q_i - q_{i,\text{référence}})^2}{(q_{i,\text{max}} - q_{i,\text{min}})^2} \quad (4.33)$$

Ce gradient fait l'objet d'une sous-tâche ayant la priorité la plus faible. Cet ajustement de posture n'est donc que partiellement réalisé puisque qu'il n'est réalisé que dans le noyau de l'application linéaire représentant l'ensemble des sous-tâches définies précédemment. Cependant il permet, tout en conservant la réalisation des sous-tâches de priorité supérieure, de réajuster la posture vers les zones de confort ou de référence pour chacune des liaisons. Ainsi, même lorsque la main a atteint son point d'arrivée, la chaîne cinématique continue à produire un mouvement interne pour tendre vers une posture de référence.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les composantes du schéma de simulation retenu. Ce schéma est basé sur une ou des relations entrées-sorties au niveau cinématique selon que l'on considère une tâche globale ou des tâches à des niveaux de priorité différents. Il exploite une technique de filtrage de la résolution des modèles cinématiques considérés à partir des valeurs singulières de l'application linéaire associée. Cette technique de filtrage permet de modifier la résolution du modèle cinématique lorsque celle-ci requiert un déplacement articulaire très important en regard de la consigne opérationnelle. Elle introduit ainsi un compromis entre optimalité du déplacement opérationnel et coût dans l'espace généralisé. Ce compromis s'appuie sur des valeurs seuil pour les valeurs singulières et celles-ci peuvent être associées à des géométries différentes puisqu'elles sont reliées à des translations et à des rotations. Il apparaît alors utile de séparer les différentes tâches et de développer la capacité à appliquer la méthode de filtrage à chacune de ces tâches séparément. Cette démarche s'inscrit dans un schéma de priorisation des tâches, appelé *pile de tâches*. Ainsi, le filtrage peut-être réglé séparément mais pas indépendamment dans la mesure où la priorisation se traduit par la limitation des solutions au noyau des tâches de priorité supérieure.

Le couplage de ces deux techniques, priorisation et filtrage, est appliqué à des logiques de pondération dans l'espace généralisé, d'évitement des butées et des auto-collisions, à la définition de potentiels attractifs autour de postures de référence et à la combinaison de tâches de pilotage du regard et de déplacement des mains en translation et en rotation. Ces techniques permettent de prendre en compte des contraintes égalités et inégalités. Elles sont expérimentées et évaluées au chapitre suivant.

Chapitre 5

Validation du modèle

5.1 Introduction

Les chapitres précédents nous ont permis de collecter des informations sur l’humain, de modéliser le problème et de réunir des informations pertinentes sur la gestuelle humaine pour définir des règles de comportement. Nous avons également décrit le schéma de contrôle que nous utilisons pour simuler des tâches d’atteinte. Dans ce chapitre, nous allons reprendre les données acquises afin d’analyser le mouvement des chaînes internes grâce à une méthode de rejeu. Ces nouvelles données issues de l’espace généralisé vont compléter les mesures faites dans l’espace opérationnel, permettant ainsi un réglage plus fin du modèle.

Par la suite, nous allons décrire la procédure mise en place pour paramétrer le schéma de contrôle. Les réglages s’effectuent en comparant la simulation avec les données acquises au chapitre 3. Cette analyse comparative va nous permettre de mesurer dans quelle proportion le mouvement simulé est réaliste.

Enfin, nous simulons une nouvelle gamme de mouvements avec notre schéma de contrôle, avec expérimentation sur des sujets. Sachant que les réglages ont été effectués sans connaissance de cette base nouvelle d’acquisitions, nous pouvons effectuer une validation plus générale de notre modèle.

Nous commençons ce chapitre par la présentation du logiciel utilisé. Notre schéma de génération automatique de mouvement est implémenté dans un logiciel développé par le LGP qui se nomme **OLARGE-TMS**. Nous présentons son fonctionnement, son utilisation et les différentes informations qu’il peut nous apporter dans le but de valider notre démarche.

5.2 Outil logiciel OLARGE TMS

Le laboratoire LGP a développé, dans le cadre d’une thèse [Hue 08] en partenariat avec la caisse régionale d’assurance maladie de Midi-Pyrénées et d’un projet AVAMIP^{1 2} en 2010, un outil logiciel nommé **OLARGE-TMS** (**O**util **L**ogiciel d’**A**ide à la **R**éduction de **G**estes pouvant conduire aux **TMS**). Cet outil est utilisé pour la génération automatique de mouvements réalistes et simule la gestuelle humaine afin d’évaluer l’ergonomie d’un poste de travail. Nous avons implémenté notre schéma de génération de mouvements réalistes sur ce logiciel qui nous permet de visualiser les gestes du mannequin.

5.2.1 Structure du logiciel

OLARGE-TMS est conçu à partir de deux outils qui permettent de réaliser d’une part les calculs numériques et d’autre part la visualisation dans un espace en trois dimensions des mouvements du mannequin.

1. AVAMIP : Agence de Valorisation de la Recherche en Midi-Pyrénées.

2. Projet AVAMIP 2010 : Développement d’un outil d’aide à la prévention des TMS “OLARGE-TMS”.

La figure 5.1 nous donne un aperçu de la visualisation 3D obtenue.

La saisie des paramètres du mouvement et la visualisation en trois dimensions sont réalisées sous GDHE (Graphic Display for Hilaré Experiments) dans le langage Tcl/Tk [Herrb 12]. Cet outil a été développé par le LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes) notamment pour des applications en robotique.

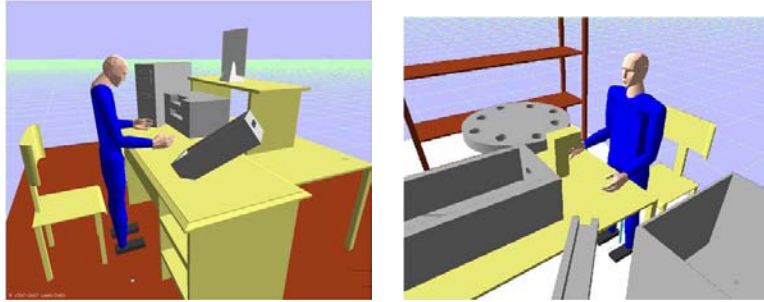


FIGURE 5.1 – Visualisation à l'aide de l'outil logiciel OLARGE TMS.

Le calcul de génération de mouvements est réalisé sous Scilab [Scilab 12], un logiciel libre de calcul numérique développé par l'INRIA (Institut National de la Recherche en Informatique et Automatique) et l'ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).

La distribution des rôles joués par ces deux logiciels est présentée par le schéma 5.2.



FIGURE 5.2 – Echange de données entre GDHE et Scilab. Le paramétrage du mannequin et de la séquence à jouer s'effectue sous GDHE. Les données sont ensuite transmises à Scilab qui génère à l'aide de notre schéma de contrôle, le mouvement du mannequin. Ce dernier renvoie finalement le geste simulé à GDHE qui peut animer le mannequin.

5.2.2 Fonctionnement et utilisation d'OLARGE-TMS

Le fonctionnement du logiciel OLARGE-TMS se décompose en 5 étapes majeures qui sont :

1. Définition du mannequin,
2. Définition de l'environnement,
3. Saisie de la séquence de mouvements,
4. Génération automatique de mouvements réalistes,
5. Visualisation des résultats.

Les trois premières étapes sont réalisées sous GDHE. La génération automatique de mouvement s'effectue sous Scilab. Enfin, le logiciel revient sous GDHE pour la visualisation des résultats.

Définition du mannequin Nous devons dans un premier temps définir le mannequin qui va réaliser le geste. Les paramètres principaux qui sont utilisés pour la simulation sont :

- sa taille (unique paramètre permettant de dimensionner le mannequin selon Winter [Winter 90]),
- sa posture initiale,
- le type de prise associé aux mains (le point d'intérêt peut être la paume de la main ou l'extrémité de son index),
- les butées hautes et basses de chacune de ses articulations.

La figure 5.3 nous montre chacun de ces menus.

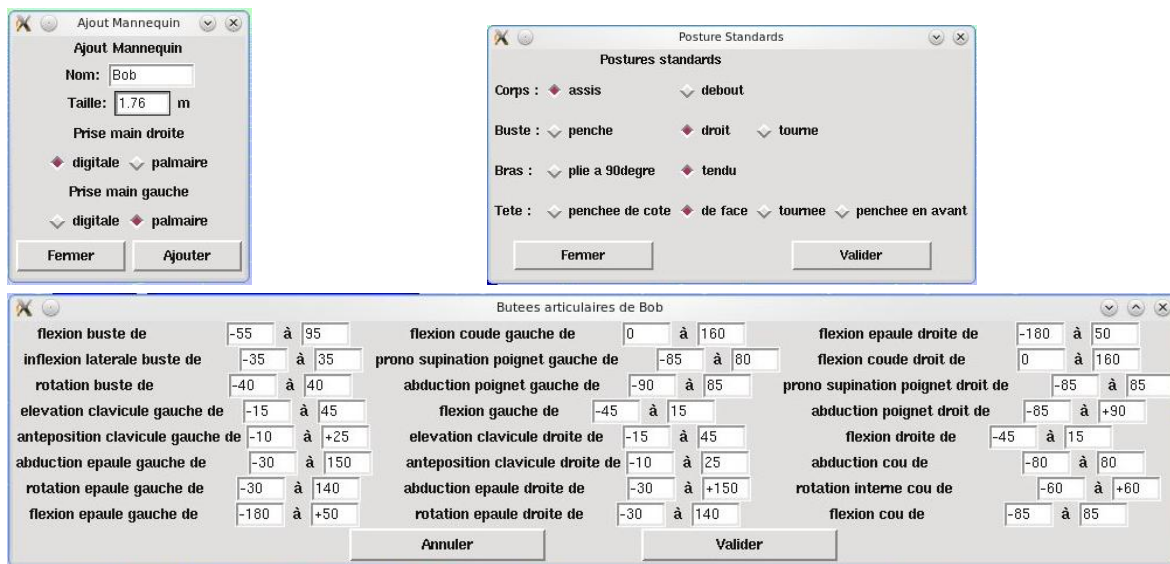


FIGURE 5.3 – Aperçu des menus de définition du mannequin.

Définition de l'environnement Afin de simuler un environnement de travail, plusieurs objets en 3 dimensions sont disponibles comme des tables, des chaises, des bureaux, des outils ... Cet environnement de travail n'est absolument pas pris en compte lors de la génération automatique de mouvements. En effet, nous n'intégrons pas les phénomènes de collision entre l'environnement et le mannequin. Cependant, l'utilisation d'un environnement permet d'avoir un rendu plus réaliste de la scène, ce qui aide à l'aménagement ou au réaménagement de poste de travail. La figure 5.4 montre un exemple du mobilier disponible. La couleur et la taille du mobilier sont ajustables.

Saisie de la séquence Nous avons défini dans le second chapitre une séquence comme étant un ensemble de situations de la (ou des) main(s). La figure 5.5 nous montre l'interface graphique qui nous permet de saisir la situation des mains. Elle se caractérise par les coordonnées cartésiennes pour la position et les angles de Bryant pour l'orientation. Nous pouvons également choisir la prise associée à la main (palmaire ou digitale). De plus, il est possible d'associer pour chacune des mains, des poids pour simuler le transport d'objet. Enfin, nous pouvons choisir de contraindre ou non la main en orientation.

Génération automatique de mouvements réalistes Cette action s'effectue grâce à Scilab. Cette étape utilise notre schéma de génération automatique de mouvements décrit dans les précédents chapitres. Les données entrantes sont représentées par les paramètres du mannequin et de la séquence sous

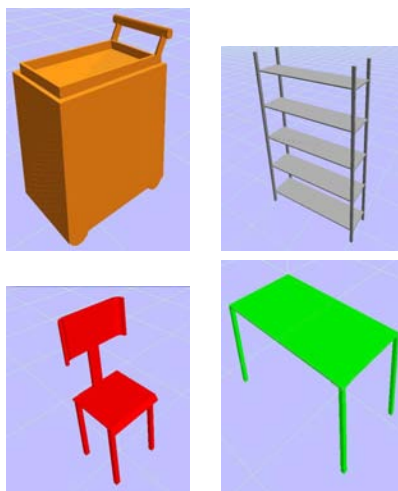


FIGURE 5.4 – Aperçu du mobilier disponible sous OLARGE TMS.

FIGURE 5.5 – Menu permettant la saisie du point devant être atteint par les mains

la forme d'un fichier informatique. Après traitement, un nouveau fichier est créé et stocke les données sortantes de Scilab avec notamment l'évolution de chaque variable articulaire.

Visualisation des résultats La visualisation des résultats nous permet de juger de la qualité du geste grâce à plusieurs indicateurs. Dans un premier temps, nous pouvons apprécier la gestuelle du mannequin grâce à la fenêtre de visualisation en 3 dimensions. Par défaut, l'ensemble des corps du mannequin est bleu. Selon la codification de [Aptel 00], la couleur des corps va changer en fonction du score attribué à une articulation. Dès lors qu'une articulation du mannequin se trouve dans une "zone non recommandée" [Aptel 00], le corps associé à cette articulation va prendre la couleur jaune. Enfin, si une articulation se trouve dans une "zone dangereuse", le corps associé à celle-ci est de couleur rouge. Nous pouvons voir un exemple sur la figure 5.6.

Le changement de couleurs des membres du mannequin est une première indication sur l'évaluation

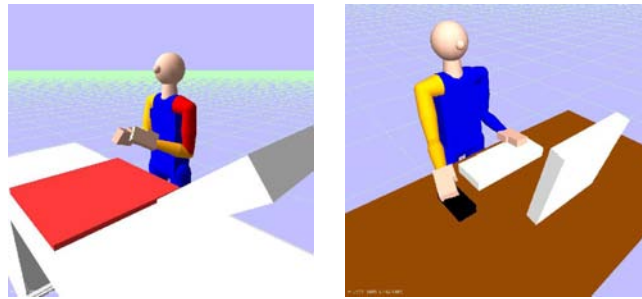


FIGURE 5.6 – Changement de couleur des corps lorsque certaines articulations entrent dans des zones acceptables ou non recommandées.

ergonomique du poste de travail. Cependant, les résultats peuvent se présenter sous forme de rapport (voir figure 5.7).

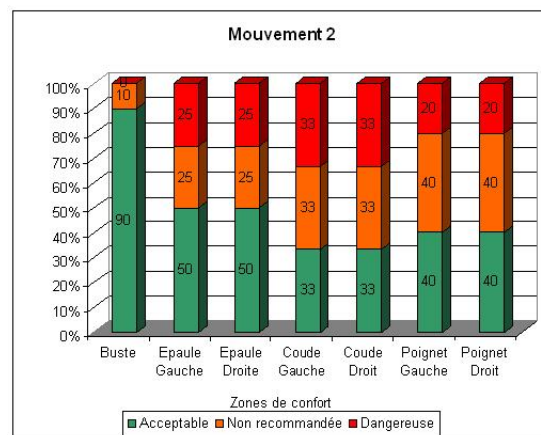
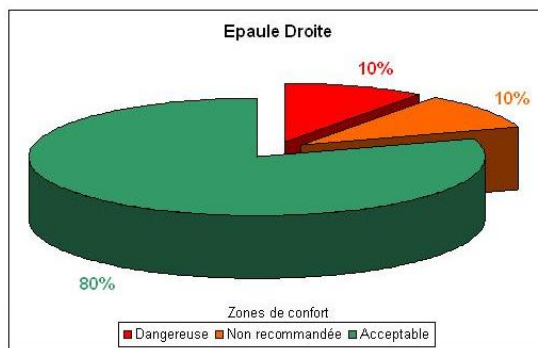


FIGURE 5.7 – Exemple de rapports permettant l'évaluation ergonomique d'un poste de travail. Chaque graphique représente le temps passé (en pourcentage) par l'articulation dans les différentes zones inconfortables et dangereuses.

5.3 Imitation du mouvement humain

Les acquisitions nous ont permis de décrire le mouvement de la main dans l'espace de la tâche. Cependant, elles ne nous permettent pas de comprendre les mouvements internes de la chaîne cinématique. Notre schéma de génération de mouvements humains se base essentiellement sur les valeurs singulières de la chaîne articulée. Aussi, nous allons mettre en place une méthode de rejeu qui par la suite, nous permettra d'analyser les données expérimentales dans l'espace généralisé (figure 5.8).

Cependant, nous devons rappeler certaines difficultés liées à l'enregistrement du mouvement. L'imitation de la gestuelle humaine est complexe et ne peut être directement transposable sur le mannequin. En effet, nous avons vu au premier chapitre qu'il existe des différences entre l'avatar et le sujet capturé, tant au niveau dimensionnel qu'au niveau cinématique. De même, les systèmes de capture ne permettent pas de mesurer la position de l'appareil locomoteur passif (squelette) puisque les marqueurs sont posés à même la peau. Les données acquises ne sont également pas parfaites en raison des bruits et problèmes d'occultation

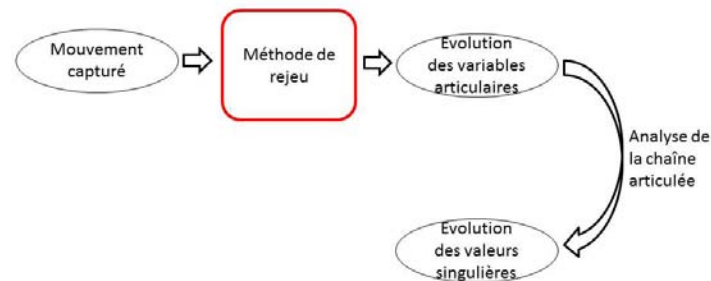


FIGURE 5.8 – La méthode de rejeu permet de reconstruire la posture du sujet capturé sur le mannequin. Par la suite, nous étudierons les capacités de déplacements de la chaîne cinématique à partir de l'évolution des variables articulaires obtenues avec cette méthode.

des marqueurs. Ces difficultés sont donc prises en compte dans la méthode de rejeu que nous développons dans les parties suivantes.

5.3.1 Principe utilisé

L'algorithme de rejeu ne prend en compte que l'orientation des corps. Etant donné que nous avons déjà analysé les mouvements de la main dans l'espace de la tâche, nous allons nous concentrer sur l'espace généralisé. Afin de restituer au mieux la posture réelle sur l'humanoïde, nous avons donc choisi de ne reproduire que l'orientation des corps de l'humain. L'orientation relative des corps les uns par rapport aux autres nous permet de reconstruire localement la configuration des liaisons.

La reconstruction de la posture, qui se base uniquement sur l'orientation des corps, ne nous permet pas de retrouver la position de chaque corps. Autrement dit, la méthode de rejeu ne peut pas être utilisée pour analyser la position de la main dans l'espace de la tâche. L'une des raisons qui explique ce phénomène est que les longueurs segmentaires sont différentes entre humain et mannequin : l'orientation de chacun des corps ne dépend pas de telles longueurs et permet de trouver une configuration de l'humanoïde proche de l'humain. La position de la main dépend de la configuration de la chaîne et des longueurs segmentaires, il est difficile de retrouver les trajectoires spatiales capturées.

Certains corps tels que le buste, la tête et la main possèdent 3 contraintes d'orientation (autour de x , y et z). En revanche, l'orientation du bras par rapport à l'avant-bras ne comporte qu'une seule contrainte. En effet, l'articulation du coude ne possède qu'un degré de liberté. Utiliser 3 contraintes d'orientation pour orienter ces deux corps contraindraient beaucoup trop la chaîne à cet endroit-ci. Par conséquent, nous alignons simplement l'axe de révolution de l'avant-bras du mannequin avec l'un des axes du repère associé à l'avant-bras dans la capture. Ces axes sont illustrés dans la figure 5.9.

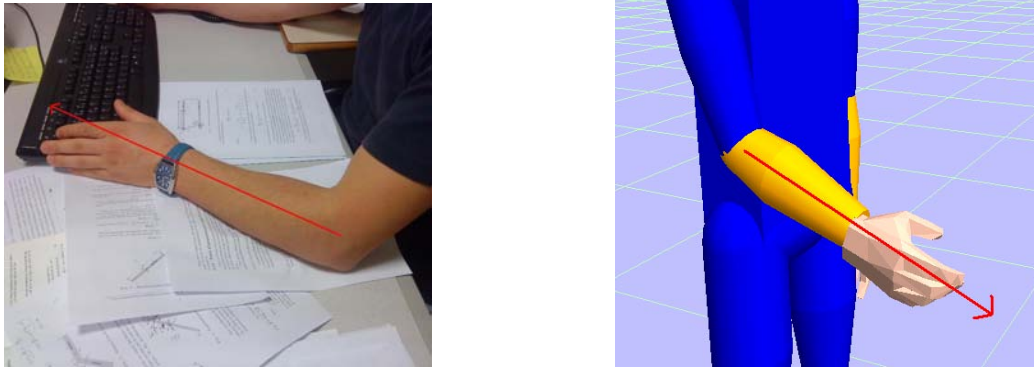


FIGURE 5.9 – Exemple de simplification de l’orientation de l’avant-bras. La direction principale de l’avant-bras du sujet réel est reportée sur l’axe de révolution de l’avatar.

5.3.2 Schéma d’imitation du geste

Par commodité, nous utilisons le schéma priorisé pour la méthode de rejeu. Le déplacement de chacun des corps de l’humanoïde est donc lié à une sous-tâche. Notre schéma d’imitation du geste va orienter les corps du mannequin en accord avec ceux du sujet réel. La pondération des liaisons est utilisée dans l’utilisation de cette méthode, également par commodité. Les contraintes d’évitement de butée et d’auto-collision ne sont pas prises en compte. Les priorités associées aux différentes sous-tâches sont illustrées par la figure 5.10. Notons qu’aucun filtrage n’est actif dans le cadre d’utilisation de cette méthode.

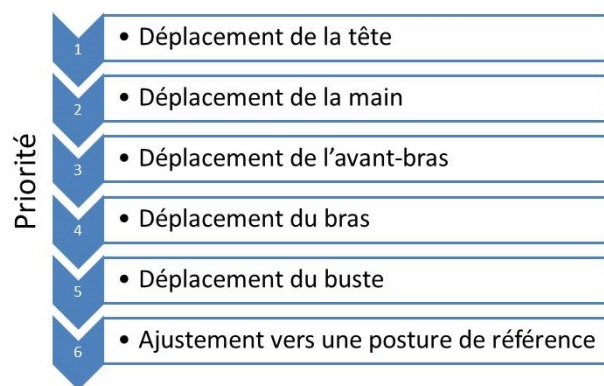


FIGURE 5.10 – Niveau de priorité de chaque sous-tâche pour la méthode d’imitation du geste. Attention, la posture de référence est différente de la posture désirée. La posture de référence est un gradient qui permet au mannequin de rester près d’une posture de repos. Elle est utile dans le sens où le mouvement de l’épaule n’est pas acquis par notre système. Ce gradient permet de conserver l’épaule dans une configuration réaliste.

Ce schéma d’imitation s’inscrit dans un algorithme afin de converger vers la posture désirée. Le geste

capturé est défini comme une succession de situations des corps de l'humain comme le montre la formulation 5.1.

$$X^t = \begin{bmatrix} X_{\text{tête}}^t \\ X_{\text{main}}^t \\ X_{\text{avant-bras}}^t \\ X_{\text{bras}}^t \\ X_{\text{buste}}^t \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Ces données servent de point de départ pour le schéma d'imitation dont l'algorithme est décrit dans 5.11.

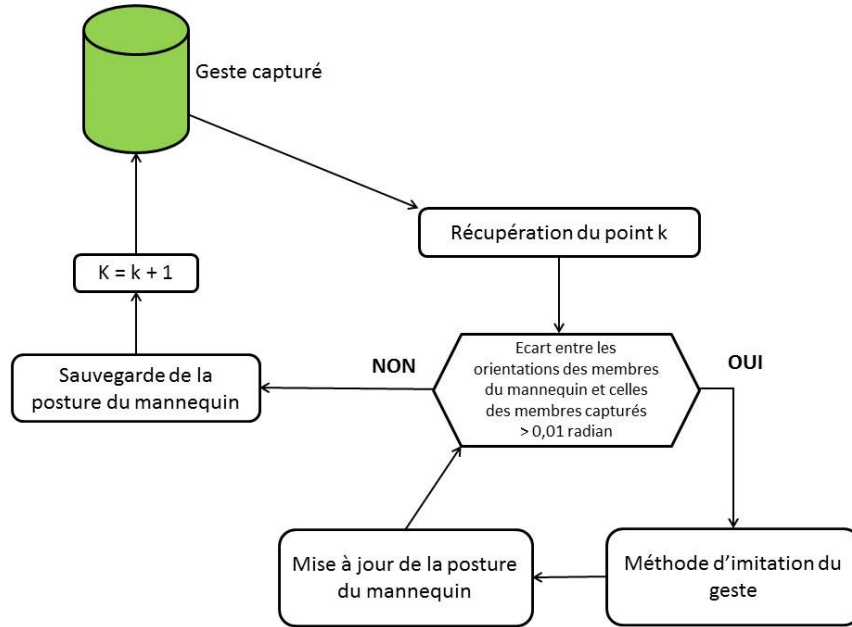


FIGURE 5.11 – Algorithme du schéma d'imitation du mouvement à partir des données capturées.

Lorsque l'orientation des corps de l'humanoïde est suffisamment proche de celle capturée, la posture est enregistrée. La précision retenue expérimentalement est de 0,01 radian.

Nous pouvons faire plusieurs remarques sur notre méthode d'imitation du geste. Tout d'abord du point de vue de l'épaule. Aucun marqueur ne permet de mesurer ce corps ci avec notre système de capture. Notre schéma d'imitation du geste contient une sous-tâche d'ajustement vers une posture de référence. Nous souhaitons que celle-ci permette à l'épaule du mannequin d'adopter une position proche de celle d'humain.

Une autre remarque concerne le conditionnement du système. Le fait de n'avoir que des sous-tâches en rotation pour chacun des membres empêche l'apparition de singularité pour le déplacement du mannequin. En effet, il ne peut y avoir aucune contradiction entre les différentes sous-tâches. De ce fait, la solution fournie par le schéma priorisé est la même que celle d'un modèle cinématique global. En effet, le schéma priorisé se différencie du modèle cinématique global uniquement dans le cas de sous-tâches antagonistes ou lors de l'adjonction du terme de filtrage.

L'imitation du geste humain va nous permettre d'analyser les mouvements internes de la chaîne cinématique pour chacun des mouvements acquis. Cet exposé de notre méthode d'imitation de l'humain nous

permet de comprendre les opérations effectuées sur les données issues de la capture. Les résultats de cette méthode deviennent donc les données entrantes de l'analyse qui suit.

5.4 Analyse des mouvements de l'appareil locomoteur passif

Nous reprenons les expérimentations issues du chapitre 3 afin d'analyser cette fois-ci l'évolution des valeurs singulières de la chaîne articulée. Nous étudions les mouvements qui contraignent :

- la translation seule de la main,
- la translation et l'orientation de la main.

Pour chacun de ces mouvements, nous avons repris les captures de mouvements que nous avons exploitées avec la méthode de jeu. Par conséquent, les données entrantes des analyses qui suivent sont les évolutions de la posture de l'humanoïde au cours du temps (voir le schéma 5.12).

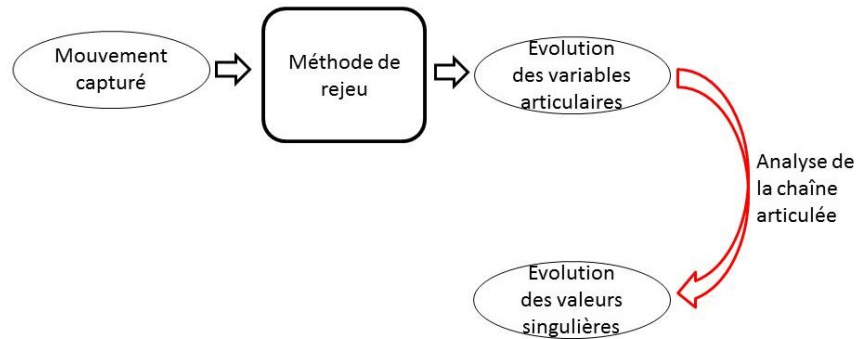


FIGURE 5.12 – L'analyse des mouvements de la chaîne articulée prend en paramètre d'entrée, l'évolution des variables articulaires issue de la méthode de jeu.

5.4.1 Mouvement avec contrainte de positionnement seule

Nous reprenons l'expérience dans laquelle, seule la main est contrainte en position (se référer à la partie 3.3). Les données expérimentales associées à cette expérience ont été exploitées à l'aide de la méthode de jeu. Un aperçu du geste réalisé pour un sujet est présent dans les figures 5.13 et 5.14 pour les mouvements 3 et 6.



FIGURE 5.13 – Visualisation du troisième mouvement acquis pour une contrainte de translation obtenu par la méthode de jeu.

Notre schéma de génération de mouvements réalistes se base principalement sur l'étude des valeurs singulières du système. Nous allons dans un premier temps, étudier l'évolution des valeurs singulières au cours du temps en utilisant un modèle cinématique global. Nous utilisons dans un second temps un système



FIGURE 5.14 – Visualisation du sixième mouvement acquis pour une contrainte de translation obtenu par la méthode de rejeu.

de priorisation et étudions de nouveau ces valeurs singulières en fonction de la priorité liée à la sous-tâche de déplacement en translation.

5.4.1.1 Analyse avec un modèle cinématique global

Nous considérons dans cette première partie un schéma global. Par conséquent, la matrice jacobienne associée à la tâche globale se compose du déplacement en translation de la main et du déplacement en orientation de la tête ($m = 6$). Pour chacun des points de la capture, nous pouvons calculer la matrice jacobienne associée au système. De ce fait, nous pouvons analyser l'évolution des valeurs singulières du système pour l'ensemble de la séquence.

L'ensemble des résultats pour chacun des sujets est disponible en annexe D.1. Nous avons choisi d'illustrer dans cette partie une étude portant sur 3 mouvements d'un seul sujet, puis sur un mouvement pour 3 sujets différents. Ces résultats sont respectivement représentés dans la figure 5.15.

Nous pouvons d'ores et déjà remarquer que dans l'ensemble des cas, le profil d'évolution de ces 6 valeurs singulières est similaire, que ce soit pour un même sujet comme pour l'ensemble des sujets. Nous constatons que les valeurs singulières s'échelonnent de 0,3 à 1,6 et que donc, la chaîne ne passe pas par des configurations singulières. Cependant, nous pouvons noter que les possibilités de déplacement du système ne sont pas les mêmes dans toutes les directions puisque les valeurs singulières n'ont pas des valeurs égales.

5.4.1.2 Analyse à l'aide du schéma priorisé

Nous analysons maintenant le geste à l'aide d'un schéma priorisé. Nous étudions le profil d'évolution des valeurs singulières lié à la sous-tâche de translation de la main dont quelques exemples sont visibles sur la figure 5.16. L'ensemble de ces profils est disponible en annexe D.2 pour plus de précisions. Cette sous-tâche de déplacement est fixée en priorité 1, la priorité la plus forte.

Nous pouvons remarquer que les trois valeurs singulières associées à la matrice jacobienne (nommée J_{pos}) sont en moyenne de l'ordre de 0,4 pour la plus basse, 0,8 pour la valeur intermédiaire et 1,1 pour la plus élevée. Là encore, nous n'avons pas de problème de conditionnement et confirmons que la chaîne cinématique ne passe pas par des configurations singulières. Il existe des directions dans lesquelles la capacité de déplacement est meilleure. Nous pouvons également observer que les profils d'évolution des valeurs singulières sont semblables d'un individu à l'autre.

5.4.1.3 Discussion

Dans le cas d'un modèle cinématique global, les 6 valeurs singulières correspondent à des couplages entre la rotation de la tête et la translation de la main. Les valeurs singulières évoluent entre 0,3 et 1,6. Dans le cas de système priorisé, nous avons pu constater des valeurs singulières entre 0,4 et 1,2 pour l'ensemble des sujets. Dans les deux cas, nous n'avons pas un mauvais conditionnement de la chaîne articulée qui conduirait à une singularité. La différence entre les valeurs singulières les plus faibles et les

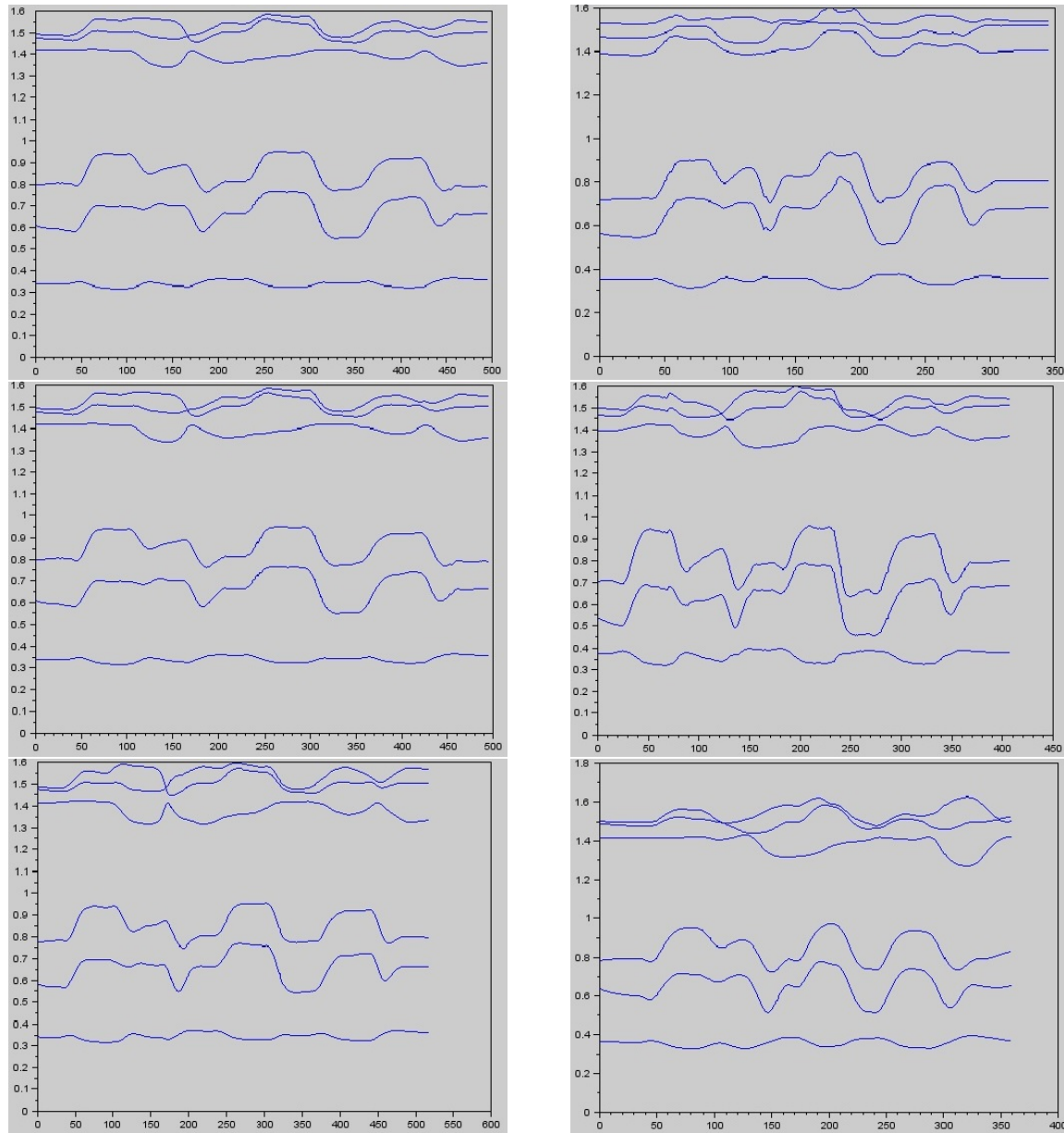


FIGURE 5.15 – A gauche : exemple de résultats de trois séquences réalisées par un seul sujet pour un modèle cinématique global. A droite : exemple de résultats d'une séquence réalisée par trois sujets pour un modèle cinématique global.

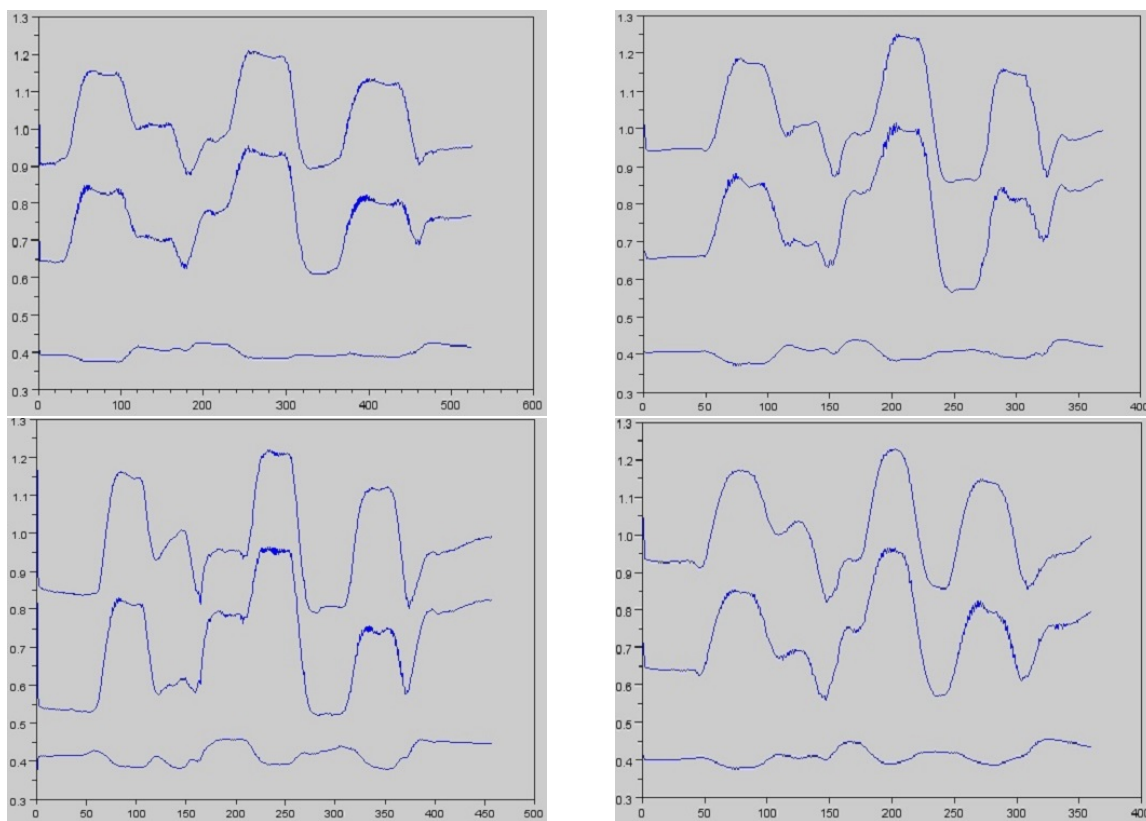


FIGURE 5.16 – Profil d'évolution des valeurs singulières associées au déplacement de la main pour 4 sujets différents. La sous-tâche de déplacement de la main possède la priorité la plus forte.

plus fortes permet de dire que la capacité du mannequin à se déplacer n'est pas la même dans toutes les directions. Le fait d'intégrer le placement du regard dans le modèle global modifie très peu la valeur singulière la plus basse si nous comparons cette valeur avec celle fournie par le schéma priorisé.

Que nous soyons dans un modèle global ou priorisé, nous avons observé des profils d'évolution des valeurs singulières qui sont similaires pour tous les individus. Nous pouvons nous poser la question de la sensibilité réelle du système, un mouvement vraiment différent peut-il produire une autre courbe d'évolution par exemple. Les personnes mesurées ne font pas toutes la même taille, n'ont pas été placées exactement au même endroit face au système de capture, ... Autrement dit, les gestes mesurés ne sont pas strictement identiques (variabilité du geste humain). Pourtant les profils d'évolution sont relativement proches. A la vue de ces résultats, nous pouvons dire que le profil d'évolution des valeurs singulières est lié à la tâche et peut être une signature de celle-ci.

5.4.2 Mouvement avec contrainte de positionnement et d'orientation

Nous souhaitons maintenant analyser les mouvements internes de la chaîne articulée lorsque celle-ci est soumise à des contraintes de positionnement et d'orientation de la main (voir la partie 3.5). Nous utilisons à nouveau la méthode de rejeu afin d'analyser les mouvements capturés lors de notre seconde expérimentation. Notre analyse va s'opérer sur un modèle cinématique global et sur un modèle priorisé afin de déterminer l'évolution des valeurs singulières au cours du temps pour la séquence entière, soit 7

mouvements. La visualisation de deux mouvements générés par imitation est présentée dans le schéma 5.17.

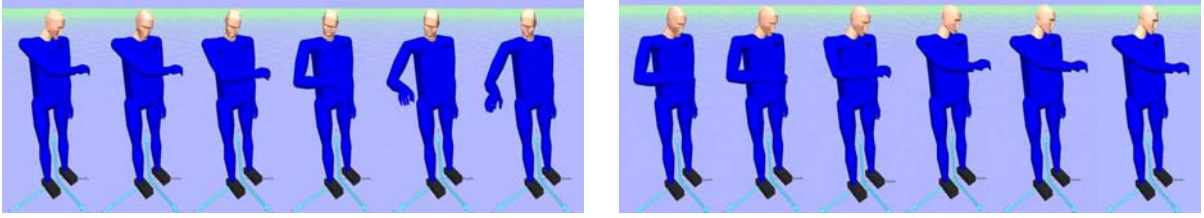


FIGURE 5.17 – Visualisation des mouvements 3 (à gauche) et 6 (à droite) par la méthode de rejeu.

5.4.2.1 Cas du modèle cinématique global

Dans le cas du modèle cinématique global, notre tâche inclut le déplacement de la tête et le déplacement de la main en translation et rotation. La figure 5.18 nous montre l'évolution des valeurs singulières de trois sujets différents. L'ensemble des résultats est disponible dans la figure D.3 placée en annexe.

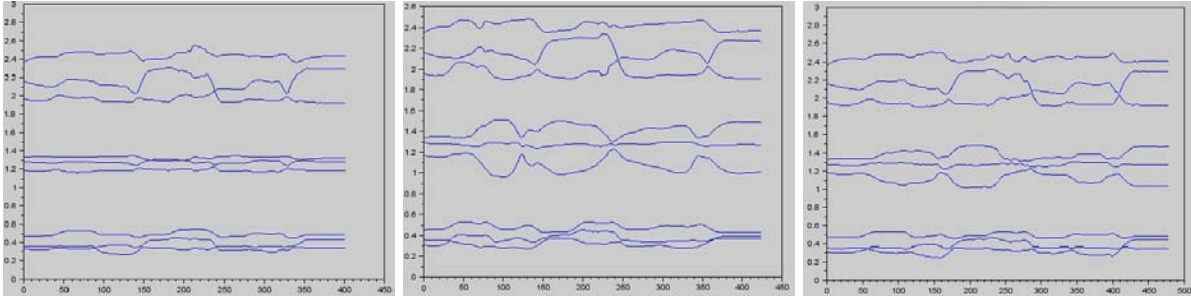


FIGURE 5.18 – Exemple de résultats de trois séquences réalisées par des sujets différents pour un modèle cinématique global.

Nous observons l'évolution de 9 valeurs singulières. Les profils d'évolution se ressemblent d'un sujet à l'autre. Les valeurs singulières sont comprises entre 0,3 et 2,5, soit un ratio de 8 entre ces deux valeurs. Les valeurs singulières n'ayant pas les mêmes valeurs, nous pouvons également dire que la capacité de mouvement du système est différente selon la direction suivie. Cependant, cette capacité à se déplacer est toujours présente et que par conséquent, la chaîne ne se trouve pas en configuration singulière.

5.4.2.2 Analyse via le système de priorisation

Nous étudions à présent l'évolution des valeurs singulières dans le cas priorisé. Nous faisons la distinction entre la sous-tâche de translation et la sous-tâche de rotation de la main et allons les analyser séparément. Dans un premier temps, nous nous penchons sur la sous-tâche liée à la translation. Nous étudions dans un second temps, l'évolution des valeurs singulières pour la sous-tâche de rotation.

5.4.2.2.a Valeurs singulières en translation

L'ensemble des profils relatifs au conditionnement de la matrice jacobienne J_{pos} est disponible en annexe (voir les figures D.4). Nous montrons sur les schémas 5.19 quelques exemples pour différents sujets.

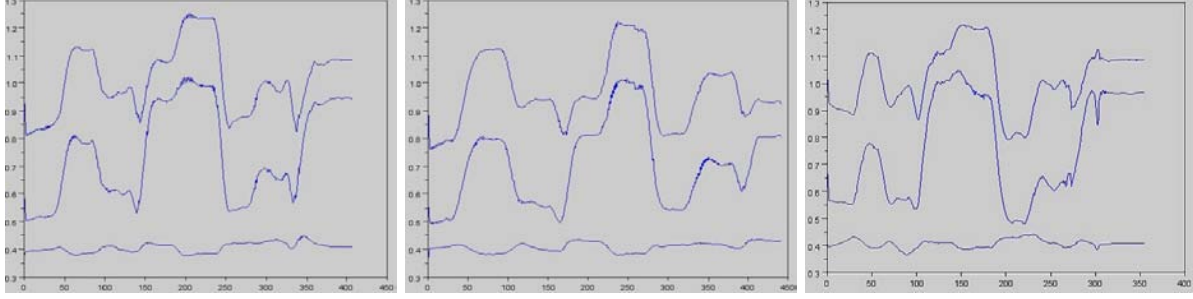


FIGURE 5.19 – Evolution des valeurs singulières pour la translation de la main lorsque le sujet est soumis à des contraintes de positionnement et d’orientation de celle-ci.

Nous pouvons également remarquer que l’évolution des valeurs singulières au cours du temps est semblable pour l’ensemble des essais. Les valeurs singulières évoluent entre 0,4 et 1,2, ce qui signifie que nous n’avons pas de problème de conditionnement mais que la capacité de déplacement de la chaîne est différente selon la direction.

Cependant, ce modèle cinématique priorisé utilise une pile de tâches qui contient plusieurs sous-tâches. Le changement de priorité de la sous-tâche pourrait avoir une influence sur les valeurs singulières. Il est donc important de connaître les conséquences que peuvent engendrer le degré de priorisation de cette sous-tâche, nous devons en tenir compte lors de la procédure de réglage de notre schéma. Aussi, nous allons étudier les profils de ces valeurs singulières lorsque la matrice jacobienne J_{pos} est associée aux projecteurs des sous-tâches précédentes. La visualisation de l’évolution des valeurs singulières est disponible dans le tableau 5.20, elle est donnée pour la séquence complète composée des 7 mouvements.

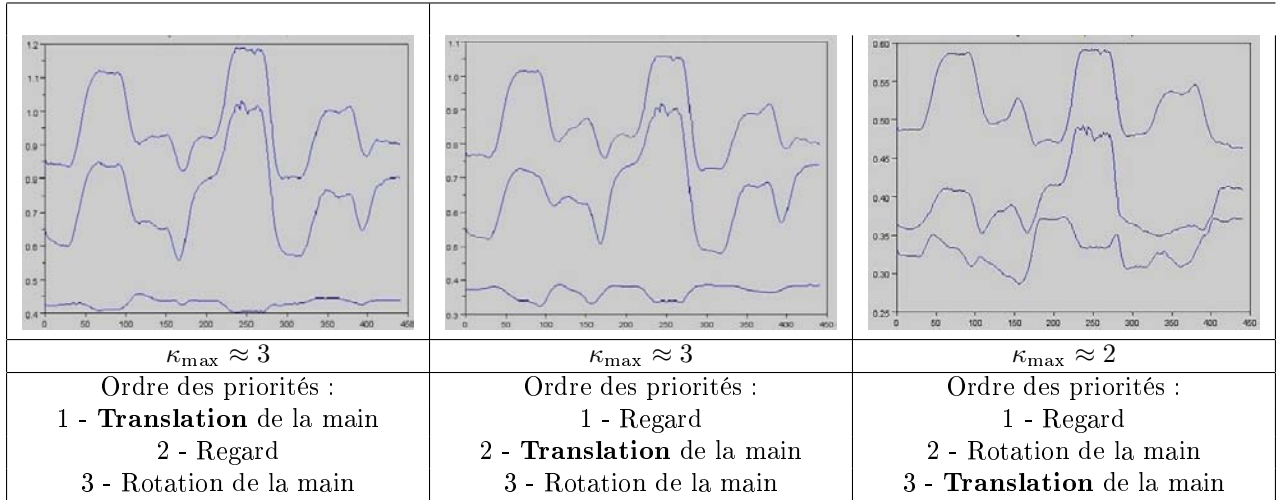


FIGURE 5.20 – Evolution des valeurs singulières pour plusieurs niveaux de priorité de la sous-tâche associée à la translation de la main.

Nous observons que, quelle que soit la position de la sous-tâche liée à la translation de la main, l’évolution des valeurs singulières conserve la même forme. En revanche, nous constatons une diminution de la valeur des σ_i . La valeur singulière la plus basse passe en effet de 0,4 à 0,35 puis 0,3 lorsque ce degré de priorité chute. De même, la valeur moyenne de la valeur singulière la plus forte diminue et passe respectivement par 1 puis 0,9 et 0,55. Le conditionnement de la chaîne articulée est toujours bon et loin

des singularités. La capacité de déplacement en translation de la chaîne diminue en même temps que le niveau de priorité.

Nous donnons également dans la figure 5.20 un aperçu du conditionnement de la matrice jacobienne associée au projecteur. Dans les priorités 1 et 2, nous pouvons observer que ce conditionnement reste le même, l'ellipsoïde de manipulabilité possède donc une forme allongée. Dans la priorité 3, nous pouvons voir que le conditionnement diminue, ce qui revient à dire que les directions privilégiées sont moins marquées et que l'ellipsoïde de manipulabilité tend à redevenir une sphère.

Par conséquent, la capacité de déplacement de la chaîne diminue avec le degré de priorité tandis que les directions privilégiées deviennent moins marquées.

5.4.2.2.b Valeurs singulières en rotation

Nous étudions à présent l'évolution des valeurs singulières relatives à la rotation de la main (matrice jacobienne J_{rot}). Les résultats sont disponibles en annexe (voir D.5). Nous avons mis en figure 5.21 des exemples issus de différents sujets.

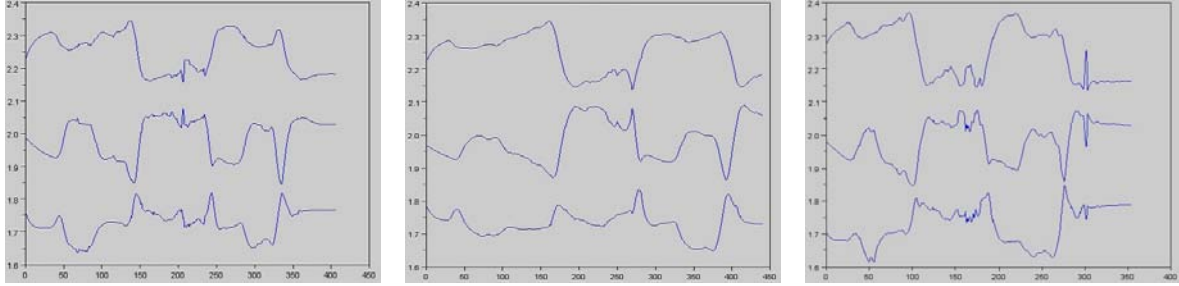


FIGURE 5.21 – Evolution des valeurs singulières en rotation lorsque le sujet est soumis à des contraintes de positionnement et d'orientation de la main.

Nous observons des valeurs singulières s'échelonnant de 1,6 pour la plus basse à 2,3 pour la plus haute. Le mannequin possède de bonnes capacités pour orienter sa main. De plus, le conditionnement de la matrice jacobienne s'approche de 1 (environ 1,44), ce qui suppose que la capacité à produire un mouvement est relativement proche suivant toutes les directions. Nous notons également que les profils des valeurs singulières sont proches d'un individu à l'autre. Ces profils sont donc assez peu sensibles aux changements de tailles des sujets et il est possible, qu'ils dépendent en grande partie de la tâche effectuée par ces derniers, ce qui confirmerait les conclusions obtenues dans la précédente analyse (partie 5.4.1).

Cependant, il est intéressant de connaître l'évolution de ces σ_i en fonction du niveau de priorité de la sous-tâche associée à la main. En effet, nous avons vu précédemment (dans le cas de la translation) que la capacité à se déplacer diminue en même temps que le degré de priorité chute. Par conséquent, nous allons projeter cette sous-tâche de rotation de la main dans le noyau d'autres sous-tâches (déplacement de la tête par exemple) afin de caractériser les conséquences d'un modèle cinématique priorisé. Les résultats de cette étude sont présents dans le tableau 5.22.

Nous observons la diminution des valeurs singulières lorsque la priorité de la sous-tâche en rotation diminue. La valeur singulière la plus basse passe de 1,7 en moyenne à 1,6 puis 1. Pour la valeur singulière la plus forte, nous observons une diminution avec des valeurs respectives à 2,2, 2,1 et 1,7. La capacité de déplacement de la chaîne se réduit au fur et à mesure que la priorité chute. Dans le troisième cas, nous pouvons observer une diminution des valeurs singulières qui indique que le système perd de sa mobilité.

Au niveau des profils d'évolution, les priorités 1 et 2 conservent la même forme. Cependant, dans le cas d'une priorité égale à 3, ce profil change. Nous expliquons ce phénomène par le fait que la sous-tâche précédente (déplacement de la main en translation) utilise les mêmes liaisons que la sous-tâche en rotation. De ce fait, le projecteur limite la capacité de déplacement de la main en rotation.

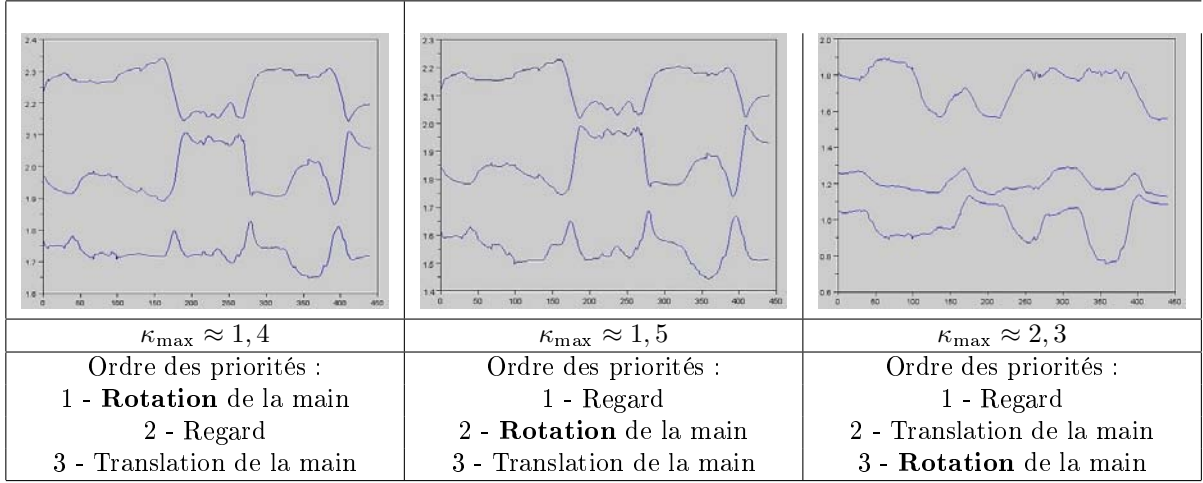


FIGURE 5.22 – Evolution des valeurs singulières pour plusieurs niveaux de priorité de la sous-tâche associée à la rotation de la main.

Si nous observons le conditionnement de la matrice jacobienne associée au projecteur, nous pouvons observer que celui-ci évolue de 1,4 à 2,3 à mesure que la priorité chute. Le conditionnement pour des priorités de niveau 1 et 2 est proche (1,4 et 1,5 respectivement), ce qui signifie que la sous-tâche associée au regard ne modifie que peu la capacité de déplacement de la main en rotation. Ce conditionnement devient plus élevé lorsque la rotation de la main arrive en troisième position (2,3), ce qui revient à dire que l'ellipsoïde de manipulabilité tend à s'aplatir et que les directions préférentielles sont davantage marquées.

Par conséquent, la capacité de déplacement diminue avec le degré de priorité de la sous-tâche et sur cet exemple les directions privilégiées se prononcent davantage.

5.4.3 Bilan sur les mouvements internes de la chaîne articulée

La méthode de rejeu nous permet d'analyser le comportement de la chaîne articulée. Nous avons repris les données acquises afin d'étudier cette fois-ci le mouvement humain dans l'espace généralisé. Cette nouvelle analyse se base sur les valeurs singulières qui représentent les capacités de déplacement de notre chaîne. Nous avons donc étudié des mouvements contraints en position puis, des mouvements contraints en position et orientation. Dans chacune de ces deux expériences, nous avons extrait les valeurs singulières dans le cas d'un modèle cinématique global et priorisé.

Dans les deux expériences, nous avons pu observer que le modèle cinématique n'est jamais en configuration singulière. Il apparaît également que la capacité de déplacement du système n'est pas la même dans toutes les directions. Les profils d'évolution des valeurs singulières possèdent tous la même forme pour l'ensemble des sujets, que ce soit dans le cas global ou priorisé. Aussi, nous en avons conclu que cette évolution des σ_i peut être associée à la tâche et peut représenter une signature du geste.

Dans le cas du modèle cinématique global, nous avons observé un ensemble de valeurs singulières qui correspondent à la mobilité du système de façon globale. Ainsi, nous analysons ensemble les déplacements liés à la main et au regard. Les valeurs singulières correspondent donc au déplacement global de la chaîne et ne caractérisent pas la capacité de déplacement propre à la main.

Dans le cas de système priorisé, les valeurs singulières sont associées à des sous-tâches et nous permettent de connaître les capacités de déplacement des corps de l'humanoïde pour chacune d'elle. Il est donc possible de séparer les aspects de translation et de rotation. Dans le cas de la translation, les valeurs singulières oscillent entre 0,4 et 1,2 et montrent qu'il existe des directions préférentielles. Concernant

l'aspect de rotation, la manipulabilité est globalement la même dans toutes les directions. Les valeurs singulières associées sont comprises entre 1,7 et 2,3. Il y a donc des directions privilégiées dans les deux cas, mais celles-ci sont moins importantes pour la rotation.

Par la suite, nous nous sommes intéressés aux conséquences du niveau de priorité pour les sous-tâches de translation puis de rotation de la main. Concernant la sous-tâche de translation, nous avons pu observer que lorsque le degré de priorité chute, la capacité de déplacement (donnée par les valeurs singulières) de la chaîne diminue tandis que le conditionnement de la matrice jacobienne associé au projecteur devient meilleur. En d'autres termes, la capacité de déplacement de la chaîne diminue et les directions préférentielles deviennent moins marquées. Lorsque la priorité diminue, le volume de l'ellipsoïde diminue et tend à se rapprocher d'une sphère.

Nous avons ensuite testé l'évolution des capacités de déplacement de la chaîne pour la rotation de la main en fonction du degré de priorité. Nous avons également noté que lorsque la priorité de la sous-tâche chute, la capacité de déplacement de la chaîne diminue, cependant, le conditionnement de la matrice jacobienne associé au projecteur se dégrade. Le volume de l'ellipsoïde diminue avec la priorité de la sous-tâche et tend à s'aplatir, laissant apparaître des directions privilégiées plus prononcées.

Nous pouvons faire remarquer que la sous-tâche associée au regard n'a que peu d'influence sur le déplacement de la main. En effet, pour la translation et la rotation de la main, lorsque celles-ci étaient placées juste après le placement du regard, leurs valeurs singulières n'ont que très peu changé, de même que le conditionnement des couples matrice jacobienne/projecteur. En effet, seules trois liaisons de l'humanoïde (au niveau du bassin) sont utilisées pour le placement du regard et le déplacement de la main et par conséquent, n'entraînent que peu de modification dans la capacité à produire des mouvements de translation ou de rotation.

Nous utilisons par la suite, le système de priorisation dans notre schéma de commande car nous pouvons facilement faire la distinction entre les différentes sous-tâches qui contraignent le système. Les profils d'évolution de ces valeurs singulières nous permettent d'introduire une première base de réglage à notre schéma de génération automatique de mouvements. Nous avons pu quantifier les valeurs minimales et maximales des valeurs singulières tant pour la translation que pour la rotation de la main. Cependant, nous avons observé des valeurs singulières relativement proches dans le cas de la sous-tâche de rotation de la main. Par conséquent, une adaptation de la méthode de filtrage sera nécessaire dans notre schéma.

5.5 Procédure de réglage

Nous avons identifié le comportement de l'humain pour des tâches d'atteinte contraignant position et orientation de la main, dans l'espace opérationnel et dans l'espace généralisé. L'idée principale qui a motivé cette thèse vient de l'hypothèse que l'être humain chercherait à minimiser à la fois le déplacement de la main dans l'espace de la tâche, tout en conservant un coût acceptable dans l'espace généralisé.

Les chemins les plus courts, les géodésiques dans l'espace opérationnel apparaissent comme une bonne approche pour simuler le geste humain. La capacité de déplacement du système, donnée par les valeurs singulières nous permet d'estimer le coût du déplacement de la main dans l'espace articulaire. Le schéma de contrôle, basé sur le principe de la pile de tâches, permet de prendre en compte ces deux aspects lors de la génération de mouvements. Cependant, plusieurs réglages sont à effectuer afin de produire un geste réaliste. Nous décrivons donc la procédure que nous avons choisie afin de paramétrer correctement notre modèle.

5.5.1 Paramètres réglables du schéma

Afin d'illustrer les différents réglages à établir, nous rappelons la formulation de la pseudo-inverse pondérée filtrée dans l'équation 5.2.

$$J_{W,F}^+ = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^T + \alpha F)^{-1} \quad (5.2)$$

avec $F = \sum_{i=1}^m \lambda_i^2 \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^T$

Etant donné que nous utilisons un schéma priorisé, nous avons la possibilité de définir des réglages distincts pour la sous-tâche en translation et la sous-tâche en rotation de la main. Par la suite, nous nommons ces réglages :

- $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$ pour la sous-tâche en translation,
- α_{Rotation} et $\lambda_{\text{Rotation}}$ pour la sous-tâche en rotation.

Nous verrons par la suite que la rotation de la main nécessite néanmoins un paramètre supplémentaire permettant d'introduire un offset pour la construction du filtre.

5.5.2 Processus de réglage

Les paramètres du schéma de génération de mouvements réalistes sont peu nombreux, mais nous pouvons encore simplifier le réglage du modèle en découpant le processus en deux grandes étapes : la première qui va paramétrer le modèle en contraignant uniquement la main en position et la seconde qui ajoute une contrainte d'orientation. Ces deux étapes font appel à des expériences différentes mais qui contraignent toutes les deux la position de la main. Nous pourrions faire le choix de réglages pour $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$ qui soient différents selon l'expérience simulée. Cependant, nous souhaitons conserver les mêmes réglages associés au déplacement en translation de la main pour plusieurs raisons.

En premier lieu, nous pouvons tenter de généraliser les réglages du modèle afin d'obtenir des réglages "universels" associés aux différentes sous-tâches. L'objectif de ce travail n'est pas de reproduire avec exactitude le mouvement humain mais de valider l'hypothèse selon laquelle, la personne déplace ses membres en essayant de minimiser ses déplacements dans l'espace de la tâche tant que le coût dans l'espace articulaire reste raisonnable.

En second lieu, nous avons étudié le fonctionnement des modèles cinématiques priorisés et connaissons les conséquences du degré de priorité d'une sous-tâche sur ses valeurs singulières. Il est donc possible, en jouant avec cette priorisation, de retrouver des phénomènes observés lors de nos acquisitions. Par exemple, nous avons émis l'hypothèse que lorsque l'orientation de la main est imposée, le positionnement de celle-ci semble se relâcher. En effet, l'index de linéarité LI que nous avons mesuré a augmenté entre l'expérience sans, puis avec contrainte d'orientation.

Afin de conserver les mêmes réglages pour le cas de la translation de la main, nous avons donc mis en place une procédure en deux grandes étapes pour le réglage de notre schéma de génération automatique de mouvements réalistes que nous détaillons dans les sections suivantes.

5.5.3 Etape 1 : réglage de la sous-tâche pour la translation de la main

Nous allons commencer par régler le schéma pour des mouvements contraignants uniquement la position de la main. Cette première étape nous permet d'avoir un schéma de contrôle avec seulement 2 paramètres réglables ($\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$). Nous nous basons sur les résultats d'analyse de l'expérience de la partie 3.3 pour ajuster ces paramètres. Pour rappel, cette expérience consiste en une séquence de 7 mouvements d'atteinte contraignant uniquement la position de la main.

Nous avons mesuré l'index de linéarité, le LI , lors de nos acquisitions de mouvements. Nous allons réutiliser ces valeurs qui nous serviront de référence pour le choix des valeurs de réglage. Cependant, nous n'allons pas réaliser les réglages sur les 7 mouvements, nous allons nous concentrer sur les mouvements 3 et 6. Ces deux mouvements ont été choisis pour deux raisons en particulier :

- **des index de linéarité différents** : le mouvement 3 fait partie des mouvements qui s'éloignent le plus de la trajectoire géodésique tandis que le mouvement 6 possède l'une des plus faibles déformations. Nous obtenons ainsi deux mouvements avec des comportements différents qui vont nous permettre de paramétrer le schéma pour qu'il suive la géodésique (à l'aide du mouvement 6) et s'éloigner de celle-ci lorsque le coût articulaire devient trop important (grâce au mouvement 3).
- **des écarts types faibles** : pour des index de linéarité élevés, le mouvement 3 possède un écart type faible (2, 21) par rapport au mouvement 7 (4, 53). Parmi les *LI* les plus faibles, nous pouvons observer que le mouvement 6 a, pour l'ensemble des sujets, l'écart type le plus élevé (2, 27) comparé aux mouvements 1 et 2. Cependant, les sujets 1, 5 et 7 ont des écarts types très faibles pour le mouvement 6 (respectivement 0, 6, 0, 76 et 0, 04). Ces écarts types faibles pour certains sujets signifient qu'ils ont reproduit la même trajectoire spatiale au cours de plusieurs séquences et que donc, ce mouvement possède un fort caractère reproductible pour une personne donnée.

Il aurait été possible de définir une méthode d'optimisation basée sur les 7 mouvements de la séquence afin de choisir au mieux les valeurs de nos paramètres. Cependant, nous verrons par la suite qu'il n'existe pas un réglage unique pour reproduire cette trajectoire mais une plage dans laquelle, il est possible de générer des mouvements réalistes. A l'issue de cette étape, nous devrions être en mesure de reproduire la trajectoire spatiale de la main dans \mathbb{R}^3 pour des gestes contraignant uniquement la position de la main.

5.5.4 Etape 2 : réglage de la sous-tâche pour la rotation de la main

Nous passons dans la seconde phase de réglage de notre schéma dans laquelle, nous nous attachons à régler les paramètres liés à la rotation de la main. Pour cela, nous disposons des variables α_{Rotation} et $\lambda_{\text{Rotation}}$. Nous nous basons sur les acquisitions de la partie 3.5 de ce manuscrit. Cette expérience contraint à la fois la position de la main et l'orientation. Nous nous basons également sur les mouvements 3 et 6, pour les mêmes raisons que nous avons évoquées dans l'étape 1.

Par conséquent, si nous comparons cette expérience à la précédente, la trajectoire spatiale de la main dans \mathbb{R}^3 a un index de linéarité plus élevé. Etant donné que nous souhaitons conserver les réglages pour la translation, nous allons jouer avec le degré de priorisation de cette sous-tâche afin d'abaisser les valeurs singulières liées au couple jacobienne/projecteur et ainsi, obtenir un filtrage plus important qui déformera davantage la trajectoire. Cependant nous n'allons pas prendre en compte le *LI* pour choisir les réglages associés à la sous-tâche en rotation et le réglage du schéma de contrôle en rotation va se faire uniquement en fonction des mouvements 3 et 6 sur la mesure de déformation *DI*.

Nous avons pu observer lors de nos expérimentations que les valeurs singulières étaient relativement proches les unes des autres. Par conséquent, nous allons modifier le pilotage du filtre (en intégrant un effet d'*offset*) afin de sélectionner les valeurs singulières que nous souhaitons modifier. Les explications de ces modifications apparaissent dans la partie 5.7.2 de ce manuscrit. Nous verrons qu'il existe également une plage de valeurs pour lesquelles, les réglages associés à la rotation de la main permettent de simuler des mouvements réalistes.

A l'issue de ce réglage, nous devrions être en mesure de simuler des gestes contraignants ou non l'orientation de la main lors de tâches d'atteinte. Ce réglage ne dépend que de mesures scalaires, les *LI* et *DI*. Au delà, des analyses plus poussées du geste simulé nous permettront de connaître les différents aspects du mouvement qui peuvent également être reproduits via ce schéma de contrôle (comme les directions de déformation des trajectoires spatiales par exemple).

5.6 Simulation du geste avec contrainte de positionnement de la main

Nous commençons par la simulation du geste avec contrainte de positionnement de la main. Cette première étape va nous permettre de régler le schéma en translation. Nous nous attachons à utiliser le

système de priorisation développé dans le chapitre 4. Nous décrivons dans un premier temps la façon dont nous allons régler le λ_{max} (ratio $\frac{\|\delta q\|}{\|\delta x\|}$) qui va représenter le seuil de filtrage pour la sous-tâche de translation. Nous réglons également le terme $\alpha_{\text{Translation}}$ qui permet de faire varier l'action du filtre dans notre schéma de simulation.

5.6.1 Protocole et paramètres initiaux

Nous allons simuler l'expérience de Morasso [Morasso 81] en contraignant seulement la position de la main. Le protocole utilisé est le même que dans le troisième chapitre (se référer à la partie 3.3).

Notre schéma de simulation utilise une contrainte explicite qui est la position de la main. À cela s'ajoutent des contraintes implicites comme le déplacement de la tête pour simuler le regard. Nous allons également insérer une sous-tâche d'évitement de butée qui va posséder la priorité la plus forte. Enfin, nous insérons dans notre schéma le gradient d'ajustement vers une posture de référence. Nous fixons les priorités de chacune d'elles comme l'indique le schéma 5.23. Notons que les sous-tâches d'évitement de butées et d'auto-collision ne sont pas toujours actives. Leurs activations seront ponctuelles et uniquement lorsqu'elles seront nécessaires³.

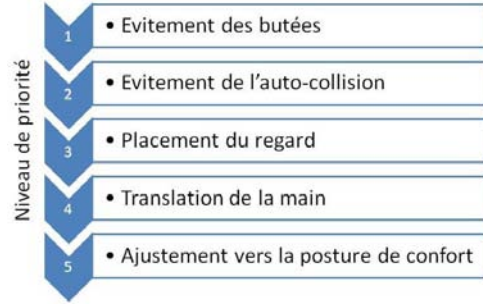


FIGURE 5.23 – Ensemble des sous-tâches classées par niveau de priorité. La priorité 1 étant la plus forte.

Nous devons fixer certains paramètres afin de commencer à régler notre modèle. Nous avons choisi un mannequin qui mesure 1,76 m, cette taille constituant la taille moyenne des sujets capturés lors de nos expérimentations. Nous rappelons dans l'équation 5.3 la formule de la pseudo-inverse pondérée filtrée.

$$J_{W,F}^+ = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^T + \alpha_{\text{Translation}} F)^{-1} \quad (5.3)$$

Cette formule fait apparaître un terme $\alpha_{\text{Translation}}$ que nous fixons arbitrairement à 1 pour une première simulation. Cela va nous permettre de comprendre le fonctionnement du système utilisant seulement le paramètre $\lambda_{\text{Translation}}$. L'équation 5.3 devient alors :

$$J_{W,F}^+ = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^T + F)^{-1}$$

Le réglage $\lambda_{max} = \lambda_{\text{Translation}}$ qui permet la construction du filtre est fixé dans un premier temps à 0,45. En effet, la méthode de rejeu a fourni des valeurs singulières comprises entre 0,4 et 1,2. Ce réglage initial va nous permettre de tester la réaction de notre schéma de commande. En effet, les valeurs singulières vont être filtrées différemment. Nous devrions obtenir un filtrage maximal sur la plus petite valeur singulière, un filtrage modéré sur la valeur singulière intermédiaire et aucun filtrage sur la plus grande valeur.

3. Pour cette expérience, les sous-tâches d'évitement de butées et d'autocollisions s'activent très rarement et modifient très peu la solution.

La simulation nous donne les résultats présentés dans la figure 5.24 a) concernant la trajectoire spatiale de la main et la figure 5.24 b) pour l'évolution des valeurs singulières associées à la matrice jacobienne en translation.

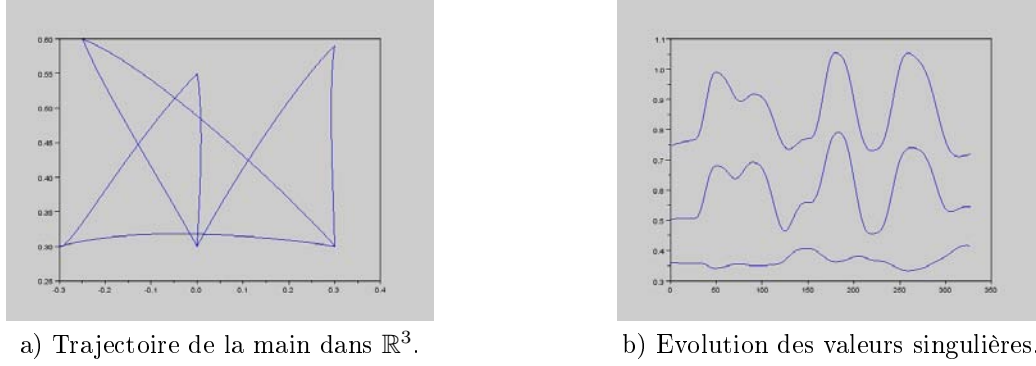


FIGURE 5.24 – Ensemble des résultats du premier essai de comportement du modèle avec des réglages non optimisés dans le cas de la simulation d'un mouvement contraint en position.

Nous observons une trajectoire spatiale de la main qui se compose de lignes droites et de courbes. Ces observations correspondent aux résultats issus de notre acquisition (se référer à la section 3.3). L'évolution du profil des valeurs singulières est également proche des profils issus de la méthode de rejeu. Par conséquent, nous allons affiner les réglages de notre modèle afin de faire correspondre au mieux les trajectoires de la main simulée avec la trajectoire moyenne de la main capturée en nous basant notamment sur l'index de linéarité LI .

5.6.2 Paramétrisation du schéma en translation

Nous savons, grâce à la méthode de rejeu, que les valeurs singulières de la matrice jacobienne associée à la translation de la main oscillent entre 0,4 et 1,2. Cependant, notre sous-tâche liée au déplacement de la main se trouve projetée dans le noyau de la sous-tâche liée au déplacement du regard. Par conséquent, les valeurs singulières associées à la sous-tâche de translation de la main vont chuter comme nous l'avions constaté avec la méthode de rejeu.

En suivant la procédure mise en place dans la partie 5.5.3, nous allons simuler plusieurs fois le geste avec différentes valeurs de $\lambda_{\text{Translation}}$ et $\alpha_{\text{Translation}}$ afin de mesurer l'index de linéarité pour les mouvements 3 et 6. La table 5.1 nous présente l'ensemble des résultats de déformation du mouvement 3 pour plusieurs réglages de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$. Une visualisation graphique sous forme de courbe de niveau est disponible sur la figure 5.25.

Le tableau 5.2 nous montre les résultats de déformation du mouvement 6 pour différents réglages de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$. Une visualisation graphique sous forme de niveau est également disponible (figure 5.26) afin de mieux observer l'ensemble des résultats.

Nous voyons d'après ces données que le réglage proposé par ce schéma de contrôle permet de trouver un ensemble de mouvements acceptables pour la simulation. Le réglage que nous avons adopté est $\lambda_{\text{Translation}} = 0,25$ et $\alpha_{\text{Translation}} = 10$. Ce réglage nous donne :

- Pour le mouvement 3 : $LI = 5,49\%$ contre $5,10\%$ pour la capture.
- Pour le mouvement 6 : $LI = 2,62\%$ contre $3,40\%$ pour la capture.

Les figures 5.28 et 5.29 permettent de visualiser le mouvement obtenu sur le mannequin. La figure 5.27 nous permet de visualiser la trajectoire de la main effectuée par la simulation.

Nous avons noté visuellement que la trajectoire simulée (figure 5.27) ne suit pas toujours la référence géodésique, il apparaît un écart. Nous pouvons remarquer que le sens de cet écart, pour chaque mouvement,

		$\alpha_{\text{Translation}}$										
		1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25
$\lambda_{\text{Translation}}$	0.23	0,47	0,37	0,38	0,58	0,99	1,43	1,87	2,31	2,99	4,12	5,31
	0.25	0,28	0,81	1,39	1,98	3,16	4,33	5,49	6,67	8,36	11,06	13,62
	0.27	0,60	1,53	2,49	3,44	5,34	7,20	8,99	10,70	13,16	16,81	19,92
	0.30	1,10	2,57	4,03	5,49	8,33	11,02	13,57	15,93	18,98	23,07	26,12
	0.35	1,85	4,06	6,21	8,29	12,13	15,49	18,42	20,93	24,00	27,76	30,21
	0.40	2,49	5,28	7,92	10,36	14,55	17,91	20,59	22,68	25,03	27,44	28,70
	0.50	3,35	6,92	10,17	13,02	17,56	20,81	23,12	24,74	26,25	27,19	26,90

TABLE 5.1 – Mesure de déformation (LI) du mouvement 3 pour différents réglages de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$.

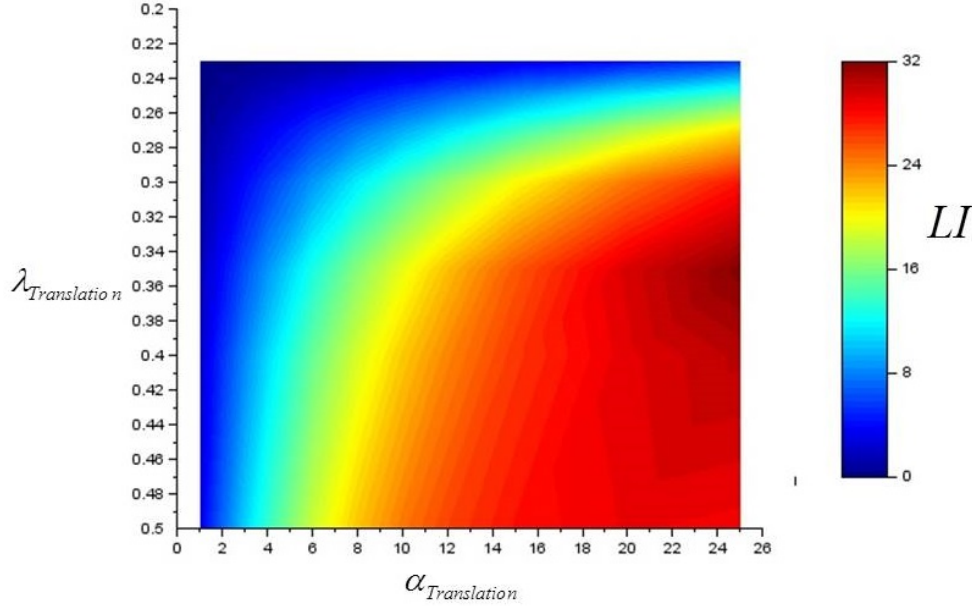


FIGURE 5.25 – Courbe de niveau représentant la mesure de déformation (LI) en fonction des valeurs de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$ pour le mouvement 3.

		$\alpha_{\text{Translation}}$										
		1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25
$\lambda_{\text{Translation}}$	0.23	0,44	0,60	0,75	0,88	1,14	1,36	1,56	1,75	2,01	2,37	2,69
	0.25	0,62	0,93	1,20	1,46	1,90	2,28	2,62	2,93	3,34	3,92	4,43
	0.27	0,78	1,22	1,60	1,94	2,52	3,00	3,43	3,80	4,31	5,04	5,65
	0.30	1,01	1,60	2,09	2,51	3,21	3,79	4,29	4,73	5,31	6,15	6,87
	0.35	1,29	2,03	2,60	3,06	3,77	4,29	4,70	5,02	5,46	6,14	6,83
	0.40	1,41	2,12	2,63	3,02	3,61	4,09	4,53	4,94	5,61	6,72	7,83
	0.50	1,36	1,88	2,21	2,43	2,70	2,89	2,99	3,09	3,18	3,33	3,65

TABLE 5.2 – Mesure de déformation (LI) du mouvement 6 pour différents réglages de $\alpha_{\text{Translation}}$ et $\lambda_{\text{Translation}}$.

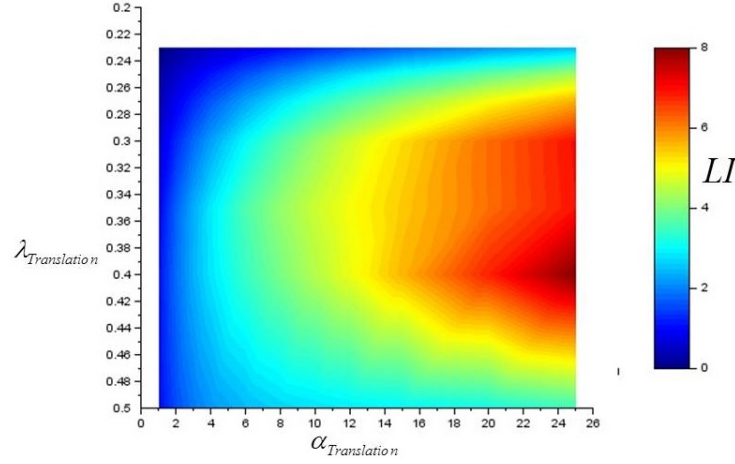


FIGURE 5.26 – Courbe de niveau représentant la mesure de déformation (LI) en fonction des valeurs de $\alpha_{Translation}$ et $\lambda_{Translation}$ pour le mouvement 6.

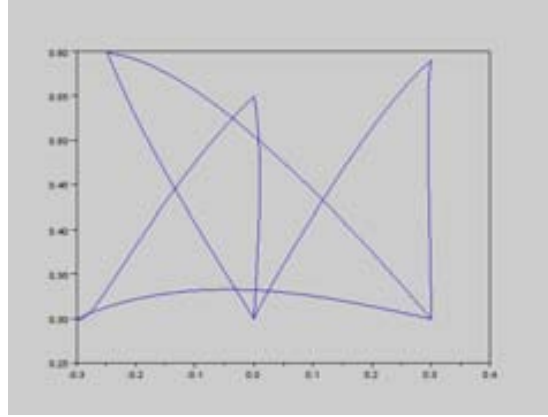


FIGURE 5.27 – Trajectoire spatiale de la main générée avec le schéma de génération automatique de mouvements réalistes

est identique entre la simulation et les données issues de la capture de mouvement (comparaison réalisée avec l'ensemble des trajectoires données en annexe B.1). Nous étudions plus en détail l'ensemble des mouvements que nous obtenons avec ces réglages $\lambda_{Translation}$ et $\alpha_{Translation}$ en relevant le LI pour chacun d'eux. Les résultats sont visibles dans le tableau 5.3. Le graphique 5.30 permet de comparer visuellement les résultats de la simulation avec les données acquises. Les déformations de trajectoires sont comprises entre les bornes relevées lors des acquisitions.

Lors de notre capture de mouvements, nous avons mesuré des sujets qui ont des tailles différentes. De même, la proportion des longueurs segmentaires entre les différents sujets diffère. La taille de chacun des corps composant notre mannequin étant simplement caractérisée par la hauteur totale, nous allons tester notre schéma de simulation pour différentes hauteurs du mannequin. Ce test va permettre de connaître la sensibilité de notre schéma face à ce paramètre. Les résultats sont donnés dans le tableau 5.4 et ne portent que sur les mouvements 3 et 6.

Nous pouvons observer que quelle que soit la taille du mannequin, notre schéma de simulation est toujours capable de restituer des déformations de trajectoires de la main qui restent dans des bornes

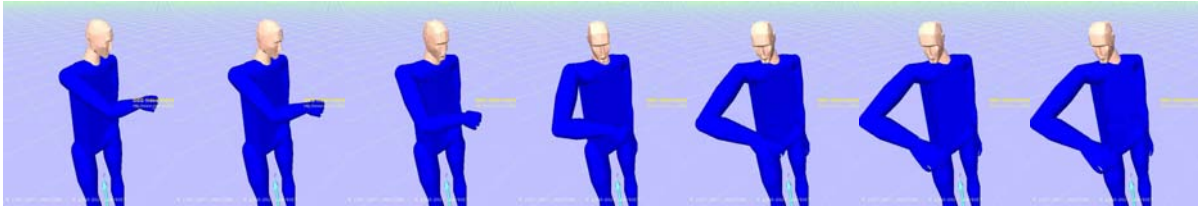


FIGURE 5.28 – Simulation du troisième mouvement pour une contrainte de translation.

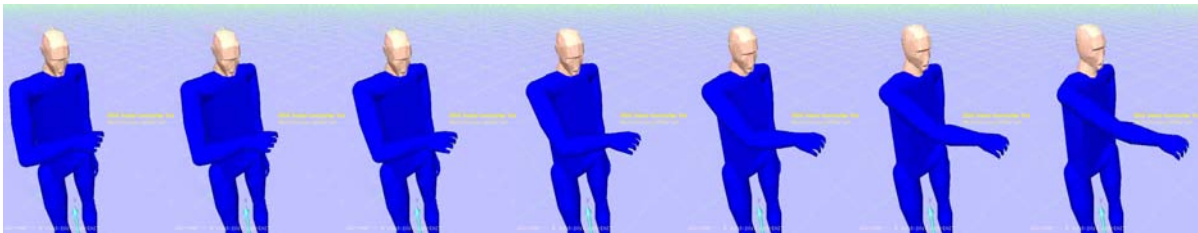


FIGURE 5.29 – Simulation du sixième mouvement pour une contrainte de translation.

Mouvement	LI capturé capturé	Ecart type capturé	LI simulé simulé
1	3, 2	2.38	3, 90
2	3, 4	1.88	2, 20
3	5, 1	2.21	5, 49
4	4, 6	3.22	1, 76
5	4, 4	3.79	3, 73
6	3, 4	2.27	2, 62
7	6, 0	4.53	5, 89

TABLE 5.3 – Comparaison entre les mesures de déformations des trajectoires capturées avec les trajectoires simulées.

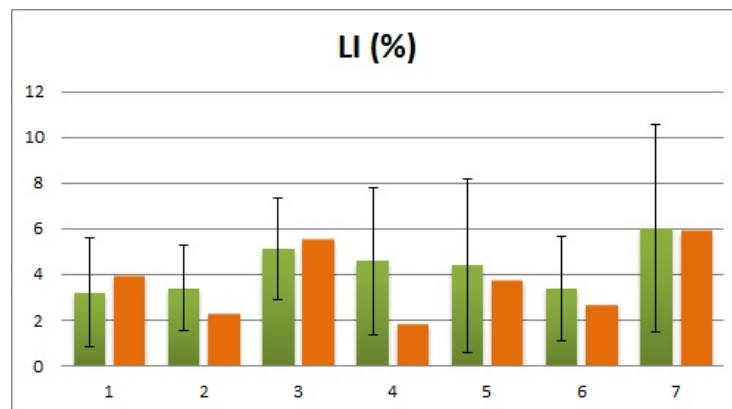


FIGURE 5.30 – Comparaison de la mesure de déformation entre les résultats d'acquisition (en vert) et la simulation (en orange).

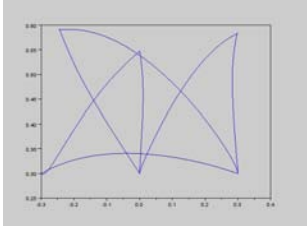
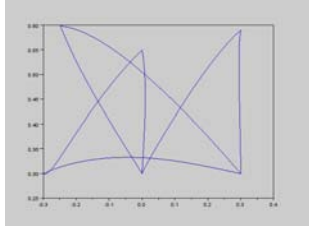
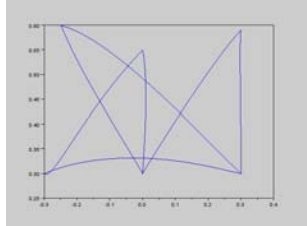
Taille	1,54m	1,76m	1,84m
<i>LI</i> du mouvement 3	6,84	5,49	5,27
<i>LI</i> du mouvement 6	3,46	2,62	1,99
Trajectoire			

TABLE 5.4 – Influence de la taille du mannequin sur les trajectoires spatiales simulées de la main.

acceptables. En regardant les trajectoires de la main pour différentes tailles de mannequin, nous pouvons remarquer que celles-ci restent proches. Par la suite, nous utilisons une taille de mannequin égale à 1,76 afin de figer ce paramètre. Les paramètres $\lambda_{\text{Translation}}$ et $\alpha_{\text{Translation}}$ sont également figés pour la suite des réglages du schéma.

5.6.3 Profil temporel de la main en translation

Nous imposons dans notre schéma de simulation un profil temporel de type minimum jerk. Cependant, à cause de la déformation de trajectoire réalisée par l'action du filtre, les incréments δx que nous produisons sont différents et nous permettent de nous éloigner de la géodésique. Cette modification de trajectoire peut entraîner des écarts par rapport au profil temporel de référence. Aussi, nous étudions les profils temporels liés au déplacement de la main en translation pour chacun des mouvements. L'ensemble des profils temporels de chaque mouvement est visible dans le tableau 5.31.

Nous pouvons observer que le profil temporel de référence imposé en amont (minimum jerk) est respecté pour l'ensemble des mouvements. Cette loi de temps que nous avons adoptée correspond également aux différents profils temporels analysés dans nos expérimentations. Par conséquent, notre schéma de simulation permet de reproduire le profil temporel du mouvement de la main dans l'espace \mathbb{R}^3 .

5.6.4 Synthèse

Nous venons de générer, à l'aide de notre schéma de simulation, une séquence de mouvements avec contrainte de positionnement de la main. Nous avons repris les données issues de la capture de mouvement afin de paramétrer correctement certains facteurs de notre système de priorisation. Ainsi, nous avons réglé l'action du filtre en modifiant les valeurs de $\lambda_{\text{Translation}}$ et $\alpha_{\text{Translation}}$. L'action de ce filtre nous permet de retrouver des *LI* proches de ceux relevés pendant les expérimentations. Les directions de déformation entre l'expérimentation et la simulation sont identiques. Par conséquent, notre schéma de génération automatique de mouvements réalistes est capable de reproduire les trajectoires acquises.

Nous avons également testé la sensibilité de notre modèle face à la taille du mannequin. Notre schéma nous permet de simuler des personnes de petite et de grande taille. La taille a donc une influence limitée sur notre schéma. La gestuelle de l'avatar dépend donc davantage de la tâche à réaliser, phénomène que nous avons déjà constaté lors de nos expérimentations avec la méthode de rejeu (voir la section 5.4.1).

Enfin, nous avons validé le fait que la main de l'humanoïde respecte toujours la loi temporelle imposée en référence. La première partie du réglage du mannequin est terminée. Nous allons maintenant passer à la seconde étape qui ajoute une contrainte d'orientation de la main.

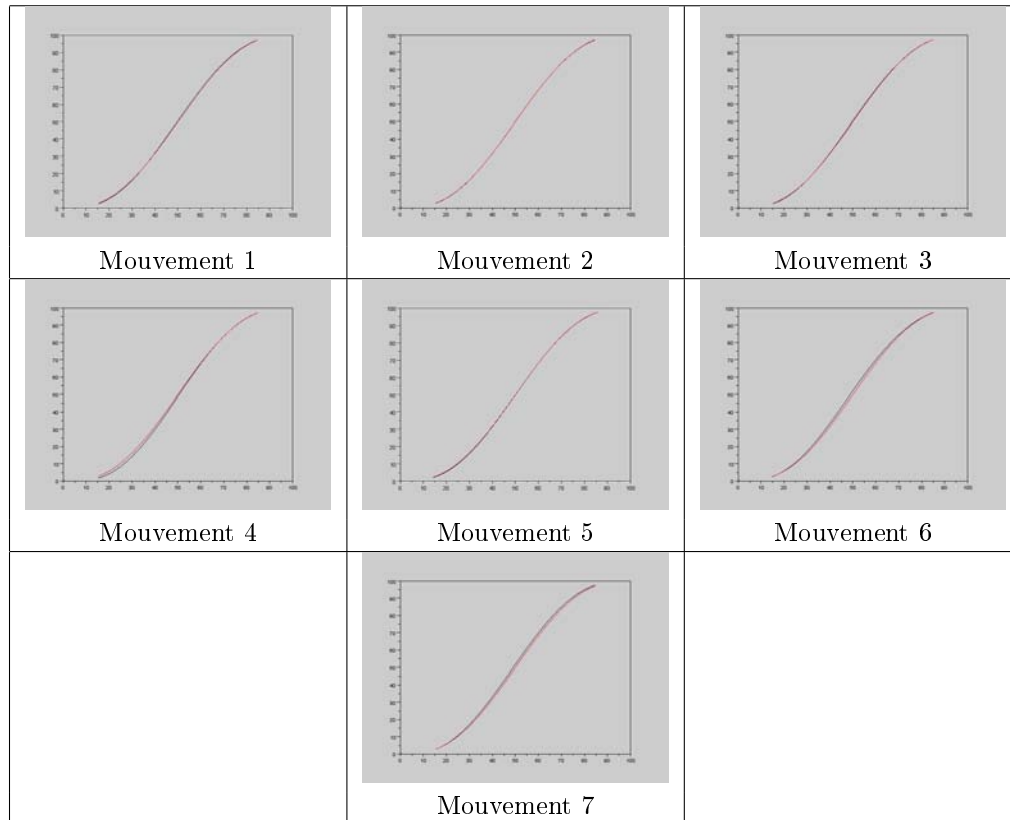


FIGURE 5.31 – Profil temporel en translation de la main soumise à une contrainte de positionnement pour un mouvement simulé. La courbe rouge représente la référence (minimum jerk) tandis que la courbe noire montre l'évolution de la translation de la main au cours du temps.

5.7 Simulation avec contraintes de positionnement et d'orientation

La principale difficulté à laquelle nous sommes confrontés est le couplage entre contrainte de translation (dans \mathbb{R}^3) et de rotation (dans $SO(3)$). En effet, nous avons correctement paramétré notre schéma pour respecter et reproduire des mouvements imposant une seule contrainte de positionnement de la main. Nous avons également vu que le déplacement en translation de la main n'était pas la seule sous-tâche réalisée par le système. Aussi, l'adjonction d'une nouvelle sous-tâche va modifier le comportement de l'humanoïde.

Dans un premier temps, nous allons vérifier que les réglages liés à la translation de la main sont toujours en accord avec les résultats d'acquisition. Dans un second temps, nous allons nous occuper à régler le modèle pour la rotation de la main, la sous-tâche associée pouvant se régler via un jeu de paramètres ($\lambda_{\text{Rotation}}$ et α_{Rotation} entre autres). Pour ce réglage, nous allons nous baser sur l'indice DI .

Le protocole de simulation ré-utilise pour cela la table de Morasso modifiée à laquelle nous ajoutons des contraintes d'orientation de la main. Le protocole de simulation est identique à celui de l'acquisition (se référer à la partie 3.5).

5.7.1 Validation des réglages liés à la translation

Nous commençons par simuler le geste avec des réglages initiaux pour l'orientation. Cette première simulation du geste va nous permettre de valider les réglages adoptés précédemment pour la translation et nous devrions obtenir des trajectoires dans \mathbb{R}^3 proches des trajectoires acquises (pour des mouvements avec contraintes de position et d'orientation couplée).

Nous allons également analyser la courbe d'évolution des valeurs singulières associées au déplacement de la main en rotation afin de déterminer si le profil d'évolution des valeurs singulières est conforme aux résultats obtenus avec la méthode de rejeu. Par la suite, nous pourrions définir une plage de réglage pour nos paramètres α_{Rotation} et $\lambda_{\text{Rotation}}$. Cette première simulation s'effectue avec les réglages $\lambda_{\text{Rotation}} = 0$ et $\alpha_{\text{Rotation}} = 1$ de manière à ne pas faire intervenir le filtrage lors de ce test initial.

Lors de cette expérience (section 3.5), nous avons noté que pour le mouvement 3, la rotation de la main a un index DI faible et un LI important, contrairement au mouvement 6 où le DI est plus important et un faible LI . Nous avons dit qu'il est possible que l'être humain donne davantage d'importance à la translation ou à la rotation en fonction des gestes à effectuer. Cependant, nous n'avons pas pu déterminer les paramètres qui influencent ce changement de choix. Ce constat est donc difficile à reproduire.

En comparant la trajectoire spatiale dans \mathbb{R}^3 des expérimentations sans et avec contrainte d'orientation, nous avons pu observer que celles-ci ont des déformations plus importantes lorsque la contrainte d'orientation est imposée. Nous en avons déduit que globalement, la rotation de la main prend davantage d'importance que son transport, hypothèse que nous allons pouvoir vérifier via cette première simulation. Nous avons choisi de reproduire ce phénomène en donnant à la sous-tâche de translation de la main, une priorité inférieure à celle de la sous-tâche d'orientation. L'ensemble des sous-tâches insérées dans notre système pour cette simulation est donné dans le schéma 5.32. Nous y donnons également les priorités de chaque sous-tâche⁴.

Nous analysons la trajectoire spatiale de la main dans \mathbb{R}^3 afin de valider les réglages précédents. Celle-ci est donnée par la figure 5.33.

Nous observons une trajectoire de la main dans \mathbb{R}^3 qui est proche des trajectoires capturées. Le tableau 5.5 et le graphique 5.34 résument l'ensemble des mesures de déformations.

Pour la plupart des mouvements simulés, nous retrouvons des valeurs de déformation qui sont proches des résultats issus de la capture. Le mouvement $n^\circ 4$ est le plus éloigné de sa valeur moyenne. Cependant, notre indice de linéarité reste toujours compris dans les bornes acceptables définies par l'écart type.

4. A noter que lors de la simulation de cette séquence, la sous-tâche d'évitement de butées s'active uniquement sur 5 pas de calcul sur environ 500 durant le mouvement 3. La sous-tâche liée à l'évitement de l'auto-collision ne s'active qu'une seule fois, également sur le mouvement 3. Par conséquent, ces sous-tâches n'ont que peu d'influence sur les gestes générés.



FIGURE 5.32 – Priorité données à l'ensemble des sous-tâches pour un mouvement contraint en position et orientation.

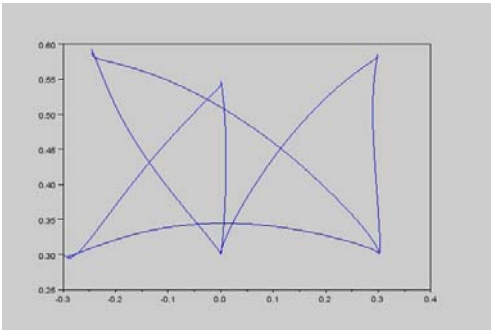


FIGURE 5.33 – Trajectoire en translation de la main dans l'espace opérationnel pour des mouvements avec contraintes de positionnement et d'orientation de celle-ci.

Mouvement	LI moyen (capture)	Ecart type (capture)	LI simulé
1	3,74	1,56	3,92
2	4,13	1,72	3,58
3	9,03	4,29	7,50
4	7,02	5,36	3,52
5	7,47	2,25	7,39
6	6,44	2,56	5,49
7	5,54	2,45	7,46

TABLE 5.5 – Déformation de la trajectoire de la main en translation.

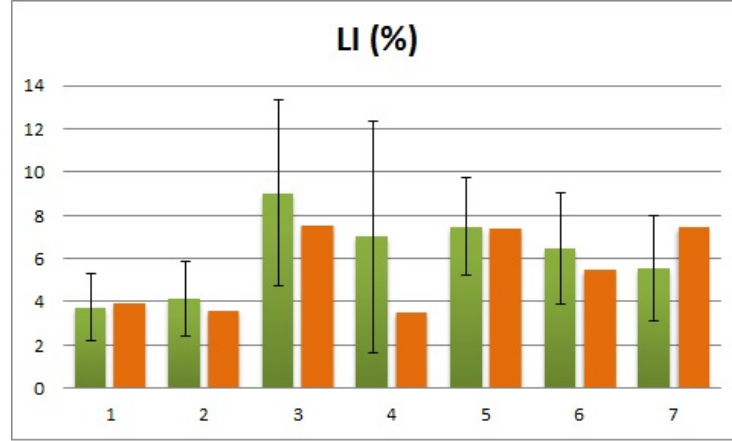


FIGURE 5.34 – Comparaison de la déformation de trajectoire entre les données acquise (en vert) et la simulation (en orange).

Nous pouvons en conclure que les réglages que nous avons adoptés dans la partie précédente concernant $\lambda_{\text{Translation}}$ et $\alpha_{\text{Translation}}$ sont corrects et permettent de reproduire la trajectoire spatiale dans \mathbb{R}^3 . Nous pouvons maintenant commencer les réglages liés à l'aspect rotation du mouvement. Pour cela, la figure 5.35 montre l'évolution des valeurs singulières du couple (matrice jacobienne associée à la rotation de la main et projecteur des sous-tâches de priorité supérieure).

Concernant la rotation de la main, l'évolution des valeurs singulières pour des réglages $\lambda_{\text{Rotation}} = 0$ et $\alpha_{\text{Rotation}} = 1$ est présentée sur la figure 5.35. La figure de gauche est un exemple d'évolution des valeurs singulières issues des données acquises. La figure de droite illustre l'évolution des valeurs singulières dans le cas de notre simulation.

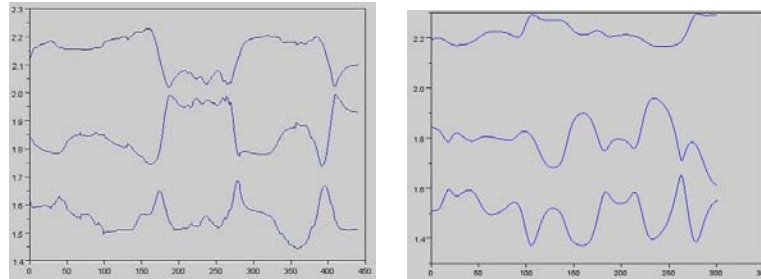


FIGURE 5.35 – Evolution des valeurs singulières de la matrice jacobienne associée à la rotation de la main lorsque celle-ci se trouve en seconde position dans la pile de tâches (projetée dans le noyau de la sous-tâche du regard). La figure de gauche illustre un exemple représentatif de la population mesurée, le graphique de droite représente le résultat de la simulation.

Nous observons un groupe de 3 valeurs singulières comprises entre 1,4 et 2,3, ce qui correspond aux bornes obtenues lors de la méthode de rejeu. Nous connaissons maintenant l'évolution des valeurs singulières associées à la matrice jacobienne projetée dans le noyau de la sous-tâche du regard. Ce que nous remarquons en revanche, c'est que cette évolution est différente de celle obtenue par la méthode de rejeu. Etant donné que les valeurs singulières sont directement liées à la posture du mannequin, cela signifie que celui-ci n'adopte pas les mêmes postures pour réaliser le geste.

Le problème est que si les valeurs singulières évoluent différemment entre méthode de rejeu et simula-

tion, il est possible que le schéma de contrôle ne puisse pas reproduire les trajectoires spatiales associées à la rotation de la main. Cependant, le terme de filtrage du système va nous permettre de modifier le comportement de la chaîne cinématique. En effet, celui-ci va limiter le déplacement de certaines articulations lorsqu'elles vont être trop sollicitées. Le réglage de la sous-tâche de rotation peut donc amener à corriger l'écart observé.

5.7.2 Réglages de la sous-tâche de rotation de la main

Nous avons vu dans le schéma 5.35 que les valeurs singulières associées à la sous-tâche en rotation sont relativement proches. Cette observation est cohérente avec les profils obtenus avec la méthode de rejeu (voir la section 5.4.2). Bien que leurs écarts soient de l'ordre de 0,9 entre la valeur la plus faible et la plus élevée, leurs valeurs sont plus importantes et comprises entre 1,4 et 2,3. Il existe donc des directions privilégiées mais elles sont nettement moins marquées que dans le cas de la translation de la main. Par conséquent, l'action du filtre va être inefficace puisqu'il va soit :

- déformer très peu l'une des directions,
- déformer le schéma dans toutes les directions.

Nous souhaitons que le filtrage s'applique principalement sur la valeur singulière la plus basse et très peu sur la valeur singulière la plus haute. Afin d'adapter notre schéma de génération de mouvements aux rotations de la main, nous introduisons un offset dans le pilotage de notre système de filtrage. La commande du filtre est représentée par le schéma 5.36 et l'équation 5.4.

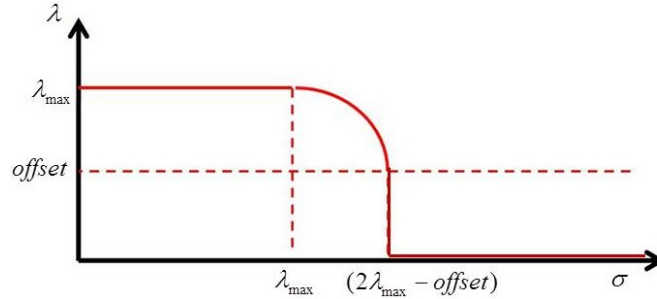


FIGURE 5.36 – Pilotage du filtre avec l'ajout d'un offset.

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{max} & \text{pour } \sigma_i < \lambda_{max} \\ \sqrt{(\lambda_{max} - offset)^2 - (\sigma_i - \lambda_{max}^2)} + offset & \text{pour } \lambda_{max} < \sigma_i < 2\lambda_{max} - offset \\ 0 & \text{pour } \sigma_i > 2\lambda_{max} - offset \end{cases} \quad (5.4)$$

En plus des paramètres $\lambda_{Rotation}$ et $\alpha_{Rotation}$, nous allons également régler ce troisième facteur. Nous avons un ensemble de trois paramètres qui nous permet de régler précisément le modèle. Nous présentons ci-dessous les résultats avec un offset de 0,8 dans les tableaux 5.6 et 5.7 respectivement pour le 3^{ème} et le 6^{ème} mouvement. Une visualisation de ces tableaux sous forme de courbe de niveau est disponible dans la figure 5.37 pour le mouvement 3 et dans la figure 5.38 pour le mouvement 6. Nous avons choisi de faire varier le paramètre $\lambda_{Rotation}$ de 1,2 à 1,8 et le paramètre $\alpha_{Rotation}$ de 600 à 1400 car c'est dans cette plage de valeurs que nous obtenons des déformations de trajectoire les plus proches des données expérimentales.

Pour le mouvement 3, nous observons que le réglage $\alpha_{Rotation}$ influe peu sur le résultat. En revanche, le paramètre $\lambda_{Rotation}$ influe beaucoup plus et il apparaît une frontière assez marquée entre les valeurs 1,4 et 1,6. Pour le mouvement 6, nous constatons également que le paramètre $\alpha_{Rotation}$ influence peu le comportement du système tandis qu'une frontière est également visible pour un $\lambda_{Rotation}$ proche de 1,4.

		α_{Rotation}				
		600	800	1000	1200	1400
$\lambda_{\text{Rotation}}$	1.20	8, 32	9, 78	10, 71	11, 34	11, 80
	1.40	8, 37	9, 29	10, 20	10, 87	11, 30
	1.60	4, 19	3, 87	3, 50	3, 10	2, 71
	1.80	3, 90	3, 71	3, 42	3, 10	2, 77

TABLE 5.6 – Mesure de déformation DI du mouvement 3 pour différents réglages de α_{rotation} et $\lambda_{\text{rotation}}$ avec un offset de 0,8.

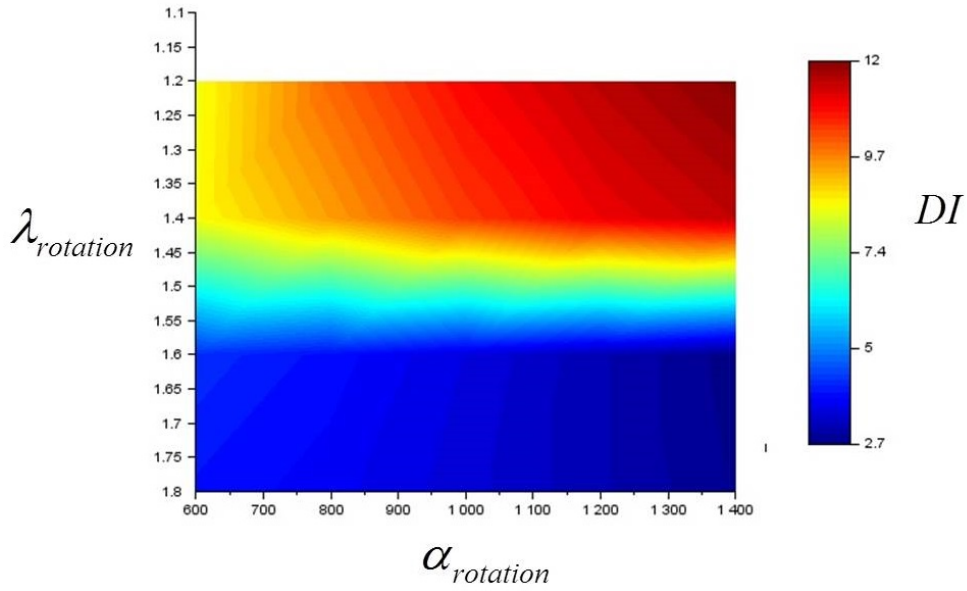


FIGURE 5.37 – Courbe de niveau de la déformation DI en fonction des paramètres α_{Rotation} et $\lambda_{\text{Rotation}}$ pour le mouvement 3 avec un offset de 0,8.

Etant donné que nous nous basons sur les résultats d'acquisition de la section 3.5, nous allons paramétrer notre schéma pour que le DI simulé soit en accord avec les DI capturés. Pour le mouvement 3, nous cherchons un réglage du DI qui s'approche de 11,86. Pour le mouvement 6, nous cherchons un réglage qui s'approche de 28,16. Nous pouvons observer sur les courbes de niveau qu'il n'existe pas un réglage unique pour obtenir ces mêmes quantités de déformation. Nous avons en effet, une plage de réglage pour laquelle, le mouvement simulé peut reproduire la trajectoire de la main dans $SO(3)$.

Le réglage que nous adoptons est de 0,8 d'offset pour le filtre, 1,4 pour le seuil $\lambda_{\text{Rotation}}$ et $\alpha_{\text{Rotation}} = 800$. En effet, ce réglage permet de nous rapprocher à la fois des déformations observées sur les mouvements 3 et 6. La visualisation du geste réalisé par le mannequin est disponible dans les figures 5.39 et 5.40. Nous étudions par la suite la trajectoire spatiale de la main simulée ainsi que le profil temporel.

5.7.3 Trajectoires spatiales

Les résultats de déformation de trajectoire LI et DI sont donnés par la table 5.8. Dans cette table, nous avons également repris les mesures issues de la capture afin de les comparer à nos résultats de simulation. Nous pouvons également visualiser ces résultats via les histogrammes disponibles dans le schéma 5.9.

		α_{Rotation}				
		600	800	1000	1200	1400
$\lambda_{\text{Rotation}}$	1.20	2,42	2,34	2,23	2,10	1,96
	1.40	21,27	23,82	25,73	27,27	28,56
	1.60	9,97	10,59	10,93	11,06	11,02
	1.80	7,78	8,66	9,30	9,77	10,10

TABLE 5.7 – Mesure de déformation DI du mouvement 6 pour différents réglages de α_{rotation} et $\lambda_{\text{rotation}}$ avec un offset de 0,8.

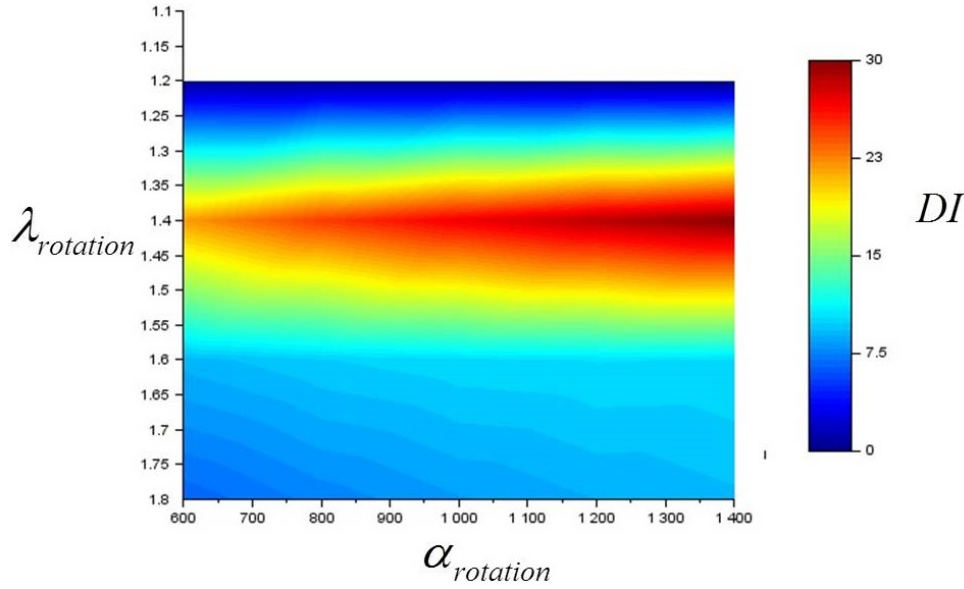


FIGURE 5.38 – Courbe de niveau de la déformation DI en fonction des paramètres α_{Rotation} et $\lambda_{\text{Rotation}}$ pour le mouvement 6 avec un offset de 0,8.

Mouvement	Capture		Simulation LI	Capture		Simulation DI
	LI	écart type		DI	écart type	
1	3,74	1,56	3,94	—	—	—
2	4,13	1,72	3,56	16,40	7,88	23,69
3	9,03	4,29	7,62	11,86	6,62	9,29
4	7,02	5,36	2,91	—	—	—
5	7,47	2,25	7,07	15,60	8,08	20,10
6	6,44	2,56	5,47	28,16	9,98	23,82
7	5,54	2,45	7,70	14,28	8,14	12,84

TABLE 5.8 – Comparaison de déformations de trajectoires dans les différents espaces pour la capture et la simulation.

Dans un premier temps, nous pouvons observer que nous respectons toujours la trajectoire spatiale de la main en translation, les mesures du LI étant conformes entre la simulation et l'expérimental. Concernant la trajectoire en rotation, nous nous basons principalement sur les mouvements 2, 3, 5, 6 et 7. Nous écartons les mouvements 1 et 4 de notre analyse. La quantité de déformation mesurée par le DI est également

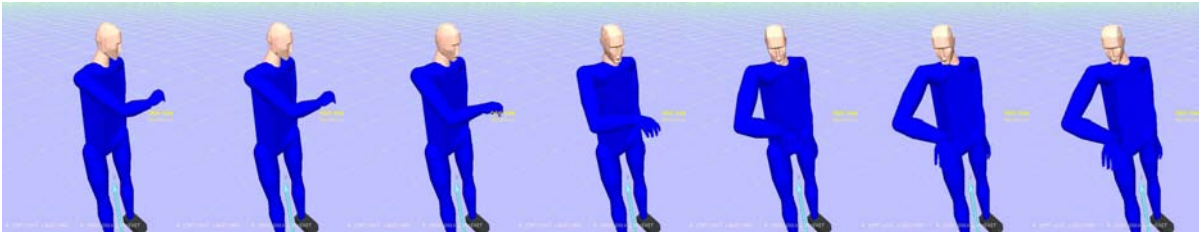


FIGURE 5.39 – Simulation du troisième mouvement pour des contraintes couplées.

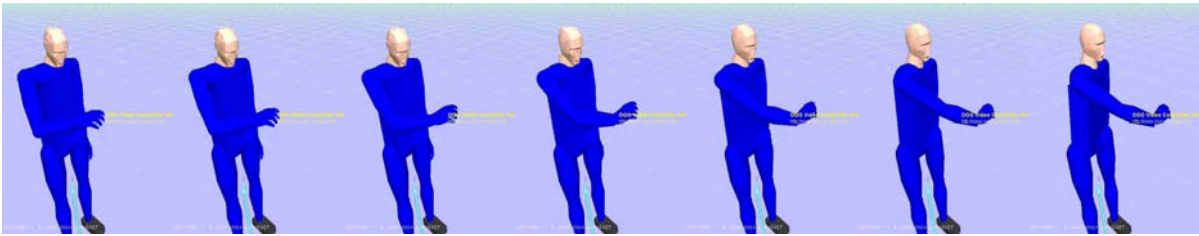


FIGURE 5.40 – Simulation du sixième mouvement pour des contraintes couplées.

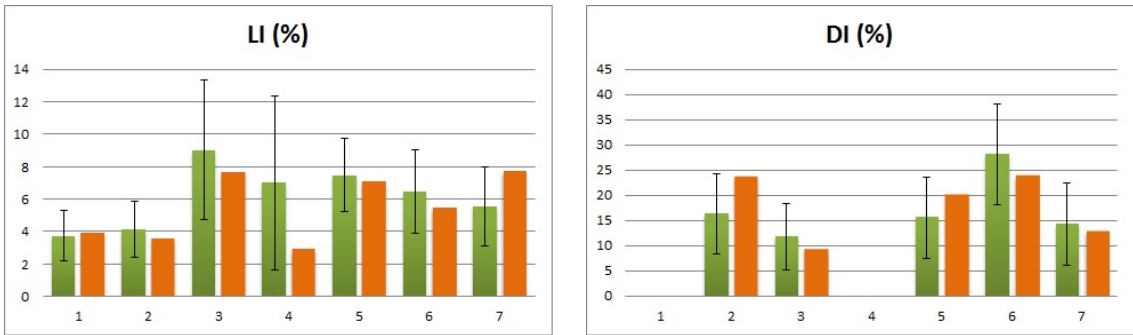


TABLE 5.9 – Comparaison des mesure de déformation entre les données acquises (en vert) et la simulation (en orange).

conforme entre la simulation et les résultats d'acquisition.

Afin de mieux cerner le mouvement de la main en rotation, nous étudions l'évolution de l'écart à la géodésique au cours du temps. Le tableau 5.10 et le graphique 5.11 résument l'écart moyen et maximal en orientation, par rapport à la géodésique.

Nous étudions à présent la direction de déformation maximale. Cette analyse s'effectue pour chaque mouvement. Nous reprenons également les mouvements 1 et 4 afin d'observer le comportement de l'humanoïde.

Mouvement 1 Le graphique 5.12 représente l'évolution de l'erreur (à gauche) ainsi que la direction de déformation (à droite) pour le premier mouvement.

L'écart maximal en orientation est très faible, de l'ordre de 0,11 degré en moyenne. Ce geste ne nécessite normalement pas de modification de l'orientation de la main. Ce résultat indique que la chaîne articulée a présenté une légère difficulté pour réaliser la tâche puisque l'humanoïde a modifié l'orientation de sa main pendant le mouvement à cause de l'action du filtre. Nous avons également observé un écart en

Mouvement	Ecart moyen			Ecart maximal		
	Capture	écart type	Simulation	Capture	écart type	Simulation
1	3, 24	1, 2	0, 11	10, 33	2, 95	0, 26
2	4, 67	2, 72	4, 32	9, 78	4, 58	10, 35
3	5, 72	2, 97	5, 38	14, 47	8, 29	11, 48
4	4, 58	1, 72	2, 26	9, 85	3, 31	5, 71
5	5, 10	2, 56	5, 79	11, 76	6, 83	16, 73
6	4, 65	1, 7	4, 68	10, 75	3, 17	12, 48
7	4, 55	2, 43	6, 05	15, 69	9, 44	15, 42

TABLE 5.10 – Comparaison de l’écart (en degré) des trajectoires en rotation de la main entre la capture et la simulation (écart moyen et maximal par rapport à la géodésique).

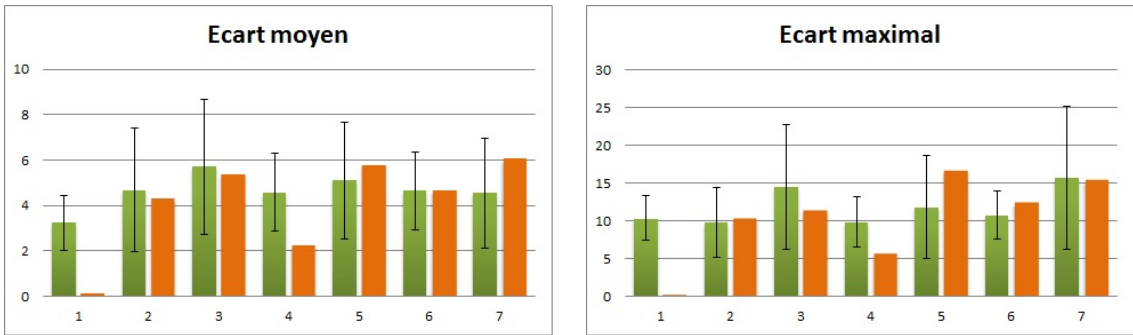


TABLE 5.11 – Comparaison de l’éloignement à la géodésique entre les données acquises (en vert) et la simulation (en orange).

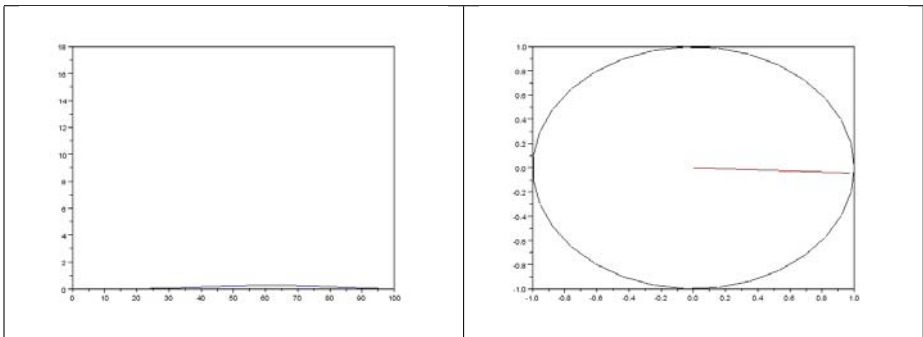


TABLE 5.12 – Courbe d’évolution de l’erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le premier mouvement.

rotation de celle-ci lors des captures de mouvements (3, 24° en moyenne lors de la capture). Notre schéma de génération de mouvements ne nous permet pas de nous éloigner beaucoup de la consigne certes, mais il nous a permis d’observer ce phénomène d’écart par rapport à la consigne. Cependant, la direction de déformation possédant une dispersion très importante lors de nos acquisitions, nous ne parlons pas de cette direction pour la simulation car nous ne pouvons pas la comparer aux données capturées.

Mouvement 2 Nous étudions la trajectoire de la main en orientation d’après le schéma 5.13.

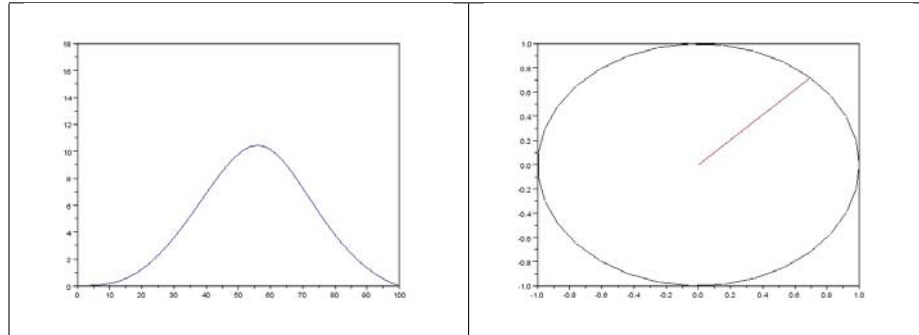


TABLE 5.13 – Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le second mouvement.

Pour ce second mouvement, nous observons une erreur maximale de $10,35^\circ$. Si nous comparons cette valeur à celle des expérimentations ($9,78^\circ$), nous pouvons dire que l'erreur est du même ordre de grandeur, de même que pour l'erreur moyenne ($4,67$ contre $4,32$ pour la simulation). De plus, les directions de déformation entre capture et simulation sont proches (voir l'annexe C.3.2).

Mouvement 3 Le mouvement $n^\circ 3$ est l'un des deux mouvements sur lequel nous nous sommes basés pour paramétrer notre modèle. Le résultat de la simulation est donné dans le tableau 5.14.

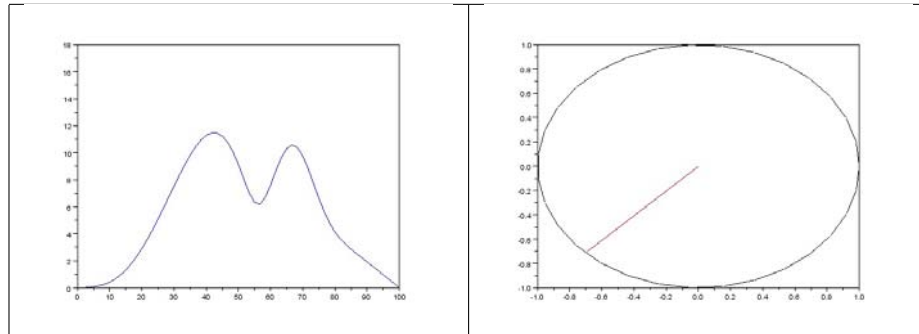


TABLE 5.14 – Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le troisième mouvement.

Nous pouvons observer que la direction de déformation est différente de l'expérimentation, opposée. Cette opposition signifie que la déformation de trajectoire s'est produite dans le sens contraire aux déformations mesurées (se référer à l'annexe C.3.3). En terme de quantité de déformation, l'erreur moyenne ($5,72^\circ$ pour l'expérimentation et $5,38^\circ$ pour la simulation) et l'erreur maximale ($14,47^\circ$ pour l'expérimentation et $11,48^\circ$ pour la simulation) sont proches.

Mouvement 4 Le quatrième mouvement nous donne les résultats présentés dans le tableau 5.15.

La consigne en rotation pour ce mouvement ne change pas et pourtant, nous obtenons un écart à la géodésique. Notre schéma de simulation a relâché certaines contraintes par le biais du filtre afin de laisser le mannequin réaliser son mouvement. Nous observons une erreur maximale de $5,71^\circ$ pour la simulation contre $9,85^\circ$ pour l'expérimentation. La forte dispersion de la direction de déformation lors des acquisitions ne nous permet pas de pouvoir réaliser une comparaison.

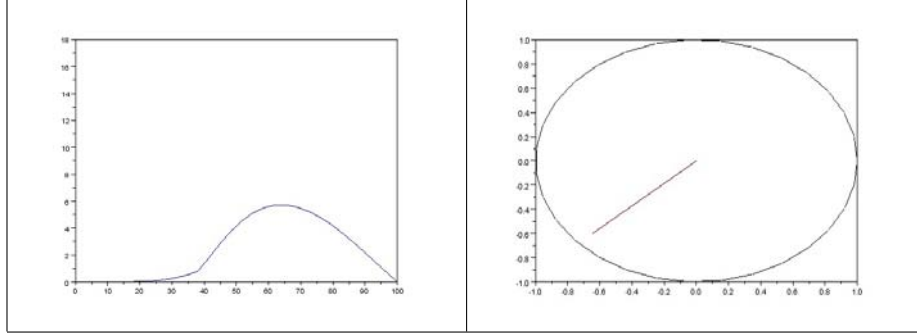


TABLE 5.15 – Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le quatrième mouvement.

Mouvement 5 Le cinquième mouvement correspond à une rotation de 90° de la main. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.16.

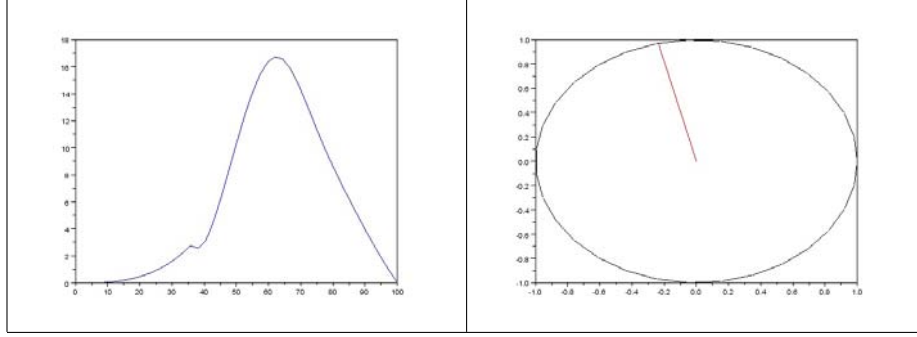


TABLE 5.16 – Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le cinquième mouvement.

La direction de déformation du geste simulé n'est pas la même que pour l'expérimentation (voir l'annexe C.3.5). Nous obtenons une direction de déformation déviée d'environ 90° par rapport à la capture. Nous observons également un écart maximal en orientation plus élevé dans la simulation ($16,73^\circ$ contre $11,76^\circ$ pour la capture). Cependant, cet écart maximum reste dans les bornes acceptables. L'erreur moyenne, en revanche, est du même ordre de grandeur.

Mouvement 6 Les résultats relatifs au mouvement 6 sont donnés dans le tableau 5.17.

Nous avons paramétré notre schéma de contrôle à partir des résultats de ce mouvement. L'erreur en orientation donnée par la simulation est très proche de l'expérimentation, que ce soit pour l'erreur moyenne ($4,65^\circ$ pour la capture et $4,68^\circ$ pour la simulation) comme pour l'erreur maximale ($10,75^\circ$ pour la capture et $12,48^\circ$ pour la simulation). En revanche, la direction de déformation n'est pas exactement la même. En effet, la capture nous donne une direction dans le quart en bas à droite (voir l'annexe C.3.6) tandis que la simulation nous donne une direction en haut à droite. L'écart entre direction de déformation simulée et capturée est d'environ 90° .

Mouvement 7 Les résultats de simulation pour le septième mouvement sont donnés par le tableau 5.18.

Nous pouvons observer une erreur maximale en rotation qui est du même ordre de grandeur pour la capture ($15,69^\circ$) et la simulation ($15,42^\circ$). Concernant la direction de déformation, nous observons un

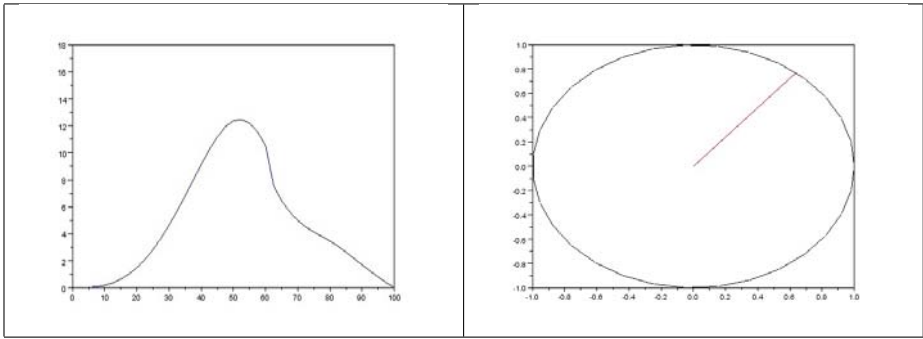


TABLE 5.17 – Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le sixième mouvement.

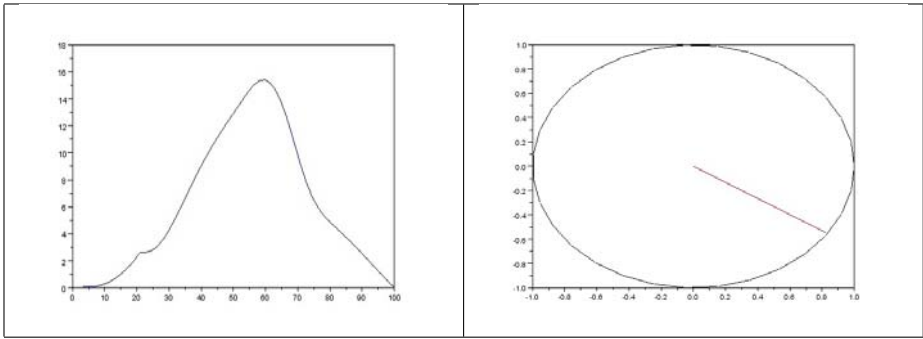


TABLE 5.18 – Courbe d'évolution de l'erreur et des directions de déformation pour la simulation concernant le septième mouvement.

écart de direction de déformation d'environ 45° par rapport à l'acquisition (se référer à l'annexe C.3.7). Par conséquent, nous ne déformons pas la trajectoire exactement dans la même direction.

Discussion Concernant la trajectoire de la main dans \mathbb{R}^3 , les réglages adoptés précédemment et basés sur les mouvements 3 et 6 nous ont permis de reproduire des déformations de trajectoires qui sont compatibles avec les constatations faites durant nos expérimentations. Par conséquent, les paramètres associés à la translation de la main fonctionnent également lorsqu'une contrainte d'orientation est ajoutée à la tâche.

Pour l'orientation de la main, nous avons adopté un réglage pour la sous-tâche en orientation de la main (offset = 0, 8, $\lambda_{max} = 1, 4$ et $\alpha = 800$) à partir des mouvements 3 et 6. Nous avons constaté que pour la plupart des mouvements (tous sauf le 1 et 4), nous avons obtenu le même écart à la géodésique que les données de capture. Nous avons cependant constaté que les directions de ces déformations maximales ne sont pas toujours en accord avec les données expérimentales, c'est le cas pour les mouvements 3, 5, 6 et 7. Notre schéma permet donc de s'éloigner de la trajectoire de référence, mais pas dans les mêmes directions que celles obtenues lors des acquisitions sur sujets réels.

5.7.4 Profil temporel

Nous étudions maintenant le profil temporel de la main lors de la simulation du geste. Nous représentons dans le tableau 5.41, les différents profils associés à la translation (à gauche) et à la rotation (à droite) de la main. En effet, nous étudions les espaces \mathbb{R}^3 et $SO(3)$ de manière indépendante. Nous prenons pour référence le profil temporel “minimum jerk” afin d'analyser les profils obtenus par le biais de la simulation.

Translation Le profil temporel dans \mathbb{R}^3 est toujours très proche du minimum jerk pour chacun des mouvements. Par conséquent, le schéma de simulation permet de conserver le profil temporel de référence.

Rotation Nous écartons les mouvements 1 et 4 de cette analyse. Pour les mouvements 2, 3, 6 et 7, les profils temporels en rotation suivent le profil de référence. Concernant le mouvement $n^\circ 5$, nous remarquons que le profil simulé passe au dessus du profil de référence. Cette particularité du profil temporel simulé est similaire au profil temporel que nous obtenons lors de nos captures de mouvements. Cela signifie que l'orientation de la main a un profil temporel plus rapide que la loi du “minimum jerk”. Notre schéma de génération de mouvements permet donc de reproduire ce phénomène. Lors de la génération de mouvements, l'action du filtre a modifié la taille des incréments produits. Cette modification de la consigne a donc entraîné au cours du mouvement, un changement de l'évolution de la vitesse de la main dans l'espace opérationnel. Ce changement a donc affecté le profil temporel et explique le fait que ce profil de référence ne soit plus respecté pour ce mouvement 5.

Discussion Notre schéma de simulation est capable de reproduire parfaitement le profil temporel de la main en translation. Nous observons un profil temporel qui équivaut au minimum jerk. En ce qui concerne l'évolution de la main au cours du temps, nous avons vu que le profil temporel de référence est également le profil suivi par les mouvements 2, 3, 6 et 7, exactement comme ce que nous avons noté pour les acquisitions.

Le cinquième mouvement avait un profil temporel différent du minimum jerk lors des acquisitions. En effet, la main s'oriente plus rapidement en début de mouvement. Nous retrouvons ce phénomène dans la simulation. Par conséquent, le schéma de contrôle peut expliquer cette différence de comportement dans ce cas précis, la déformation du profil temporel étant la conséquence de l'action du filtre.

5.7.5 Conclusion

Le réglage du modèle pour des mouvements contraignant position et orientation de la main est passé par plusieurs étapes successives. Nous avons, dans un premier temps, vérifié que les réglages adoptés

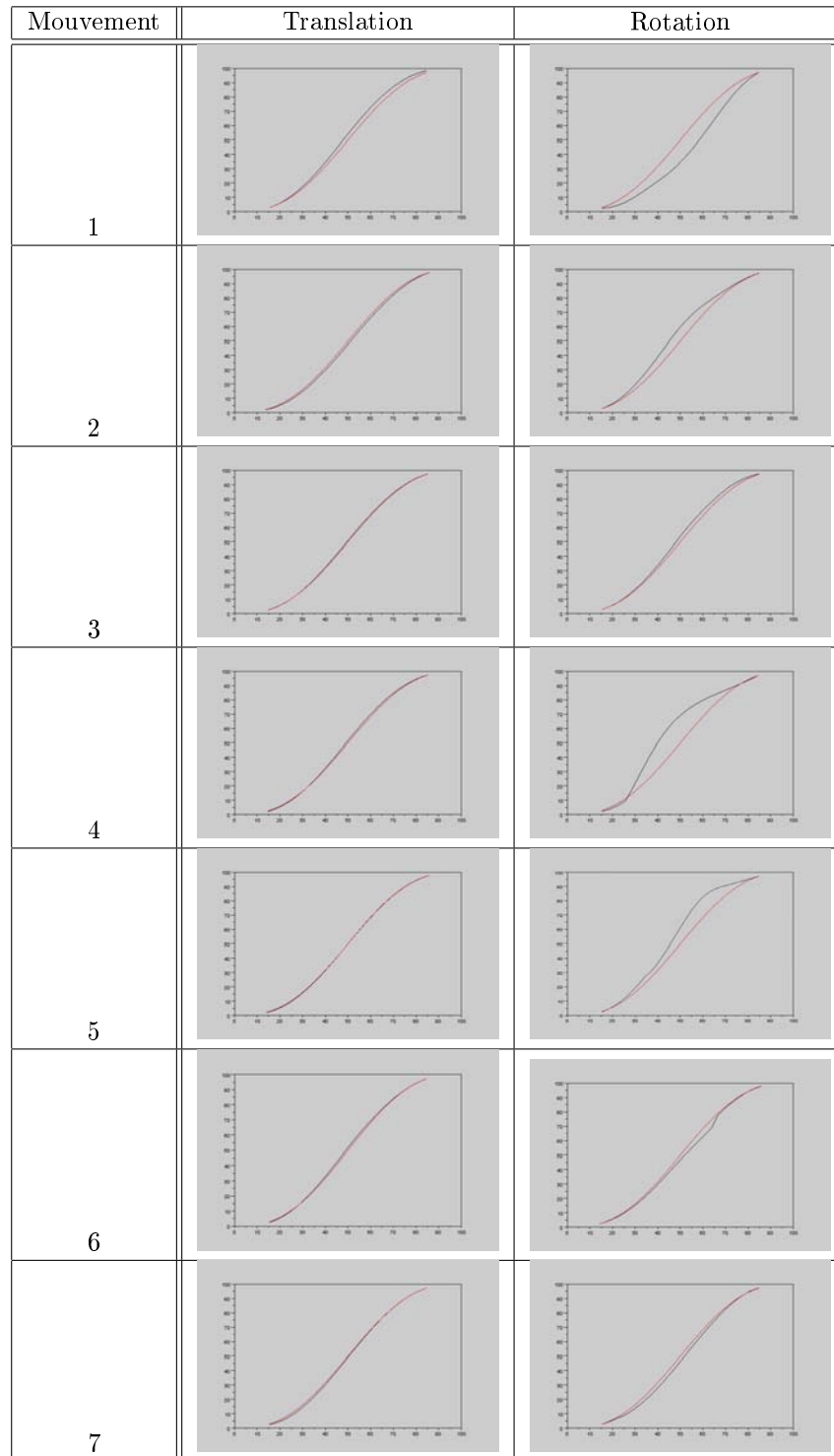


FIGURE 5.41 – Profil temporel en translation (gauche) et rotation (droite) de la main pour un mouvement simulé avec contrainte de positionnement et d'orientation. La courbe rouge représente la référence (minimum jerk) tandis que la courbe noire montre l'évolution de la translation/rotation de la main au cours du temps. Afin de simplifier la comparaison de l'ensemble des profils temporels, les axes ont été normés.

pour la translation sont toujours acceptables⁵ dans cette nouvelle expérience. Nous nous sommes alors intéressés au profil d'évolution des valeurs singulières pour la rotation. Nous avons pour cela effectué une expérience test afin d'avoir un aperçu de l'évolution des valeurs singulières. En analysant leurs profils, nous nous sommes rendu compte que ces valeurs singulières étaient relativement proches entre elles. Cette particularité nous a conduits à intégrer un offset dans notre système de filtrage.

Ensuite, nous avons réglé notre schéma de simulation en incluant des contraintes d'orientation de la main. Nous avons pu observer qu'il n'existe pas une solution unique pour reproduire la trajectoire de la main. Cependant, nous avons choisi les réglages qui semblent les mieux adaptés puisqu'ils permettent de reproduire à la fois les trajectoires de la main dans \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Nous nous sommes basés sur les mouvements 3 et 6 pour ajuster correctement nos paramètres. Nous avons constaté qu'en terme de déformation mesurée par le DI , la plupart des mouvements simulés sont fidèlement reproduits, excepté le quatrième. En terme de direction de déformation, si l'aspect translation nous satisfait grandement, il n'en est pas de même pour l'aspect rotation. Nous avons en effet observé des directions de déformations différentes dans de nombreux cas. Le profil d'évolution des valeurs singulières n'étant pas le même entre méthode de rejou et simulation, il est normal de trouver des résultats différents.

Concernant l'aspect temporel, la simulation reproduit parfaitement les profils temporels relevés lors des expérimentations, que ce soit dans l'espace \mathbb{R}^3 ou $SO(3)$. En effet, le "minimum jerk" imposé au système est suivi par la main du mannequin dans l'espace de la tâche. La déformation spatiale des mouvements affecte donc peu la consigne temporelle.

5.8 Validation du modèle

Afin de valider notre schéma de génération et les réglages choisis, nous allons simuler de nouvelles expérimentations afin de tester de nouveaux mouvements de la main. Cette validation se décompose en 2 parties qui vont mettre en jeu :

- le caractère reproductible du geste : travaillant sur des gestes répétitifs, nous allons dans un premier temps tester notre schéma sur une tâche effectuée en boucle afin de connaître le comportement de notre mannequin. Ce premier test va nous permettre de quantifier la sensibilité du schéma face à la posture initiale du mannequin. Il va également nous permettre de savoir si le geste est reproductible. Le résultat peut également nous donner une mesure de la robustesse du schéma.
- un mouvement en forme d'étoile dans le plan horizontal : nous avons réglé notre schéma de génération automatique de mouvements réalistes à l'aide d'un certain nombre de mouvements clés. A présent, la tâche consiste à simuler de nouveaux gestes afin de savoir si notre modèle est capable de les prédire. Nous devons pour cela effectuer des simulations sur des gestes qui sont différents de ceux servant aux différents réglages. Cette séquence répétitive laisse apparaître un nouveau mouvement que nous allons étudier.

Chacune de ces deux nouvelles expérimentations a fait l'objet d'acquisition sur sujet réel. Ainsi, nous pouvons comparer les données acquises avec la simulation. Ces expériences vont nous permettre de juger de la pertinence de notre schéma de simulation.

5.8.1 Reproductibilité du geste

La première validation de notre schéma de génération automatique de mouvements humains consiste à reprendre les deux expériences du troisième chapitre et à les faire jouer plusieurs fois de suite à notre mannequin. Nous aurons ainsi une analyse de la répétitivité du geste dans le cas d'une contrainte de positionnement seule et une autre dans le cas de contraintes couplées. Nous pourrions ainsi savoir si les réglages adoptés restent cohérents au fil du temps. Nous allons également analyser la sensibilité du schéma

5. Acceptables au sens que la quantité de déformation des trajectoires mesurée par le LI est comprise dans la variabilité du geste humain.

face à la posture du mannequin. En effet, après plusieurs séquences, la posture de l’humanoïde peut être différente en début et fin de chaque mouvement. Nous allons également essayer de voir dans quelle proportion la posture initiale de la séquence conditionne le geste simulé.

5.8.1.1 Répétitivité sous contrainte de positionnement

Nous simulons une série de 3 séquences successives contraignant uniquement la position de la main. Nous analysons par la suite les résultats en nous focalisant sur la trajectoire spatiale. La trajectoire prise par la main est donnée en figure 5.42. Les mesures de déformation pour les mouvements 3 et 6 sont données par le tableau 5.19.

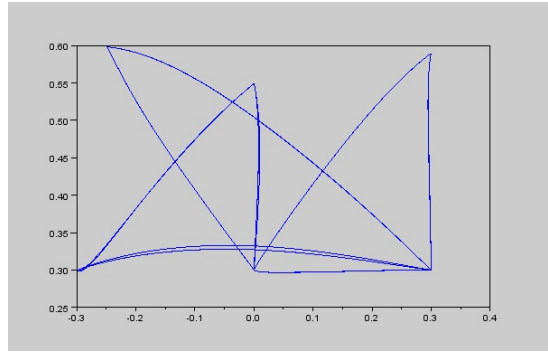


FIGURE 5.42 – Simulation de 3 séquences successives pour une contrainte de position de la main.

Cycle	Mouvement 3	Mouvement 6
1	5, 49	2, 62
2	4, 65	2, 63
3	4, 64	2, 64

TABLE 5.19 – Mesure de déformation LI des mouvements 3 et 6 pour un cycle de 3 séquences successives.

Nous constatons que les mesures de déformations restent globalement proches d’un cycle à l’autre. La déformation du mouvement 3 chute dès le second cycle mais celle-ci reste comprise dans les bornes acceptables du geste si nous reprenons l’étude expérimentale du troisième chapitre. Par conséquent, notre schéma de génération de mouvements permet de réaliser des séquences répétitives, tout en conservant des trajectoires spatiales de la main réalistes.

5.8.1.2 Contraintes en position et orientation

Nous réutilisons l’expérimentation avec contraintes de positionnement et d’orientation de la main. Le mannequin va jouer successivement 5 séquences. La trajectoire dans \mathbb{R}^3 de la main est donnée par la figure 5.43.

Nous constatons que les trajectoires sont quasiment identiques pour chaque mouvement. Nous observons une légère différence pour les mouvements 2 et 3. Le tableau 5.20 résume l’évolution de la déformation de trajectoire pour le mouvement 3.

Nous constatons que notre schéma de génération automatique de mouvements nous donne des solutions vraiment très proches après une succession de séquences. Pourtant, le début de chaque séquence met en jeu une posture légèrement différente de l’humanoïde. Nous pouvons conclure que la posture initiale du mannequin affecte peu l’ensemble des résultats puisque nous retrouvons des trajectoires spatiales proches

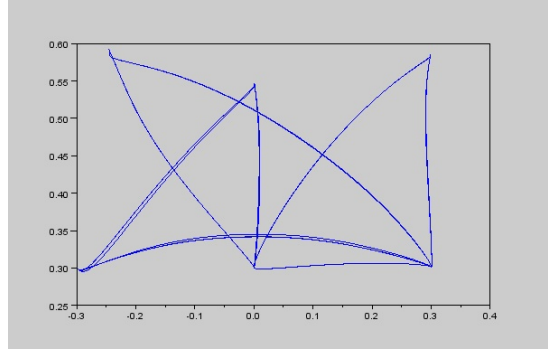


FIGURE 5.43 – Trajectoire spatiale de la main en translation pour 5 séquences de mouvements effectuées avec le schéma de contrôle.

Espace	Cycle				
	1	2	3	4	5
LI	7,62	7,04	7,02	7,02	7,02
DI	9,29	11,27	11,47	11,49	11,49

TABLE 5.20 – Evolution de la déformation de trajectoire pour le mouvement 3.

après plusieurs cycles. En effet, l'évolution du *LI* et du *DI* atteint rapidement un palier puisque les mesures de déformation sont stables dès le second cycle. Ces mesures de déformation sont bien entendu toujours dans des bornes acceptables du geste humain. Notre modèle permet donc de simuler le geste humain sur plusieurs séquences en étant peu influencé par la posture initiale. Autrement dit, le mouvement résultant dépend davantage de la tâche à réaliser, phénomène que nous avons déjà observé lors de nos acquisitions.

5.8.2 Etude d'un nouveau mouvement plan

Nous allons valider une nouvelle étape de notre schéma de génération de mouvement en restant basé dans le plan horizontal. Nous utilisons pour cela une expérience qui génère une trajectoire de la main dans plusieurs directions à partir d'un même point. La figure 5.44 montre le dispositif que nous utilisons, la séquence à jouer est représentée par 5.5, le tableau 5.21 illustre les coordonnées de chaque points.

$$0 \Rightarrow A \Rightarrow 0 \Rightarrow B \Rightarrow 0 \Rightarrow C \Rightarrow 0 \Rightarrow D \Rightarrow 0 \Rightarrow E \Rightarrow 0 \quad (5.5)$$

Point	Coordonnée X	Coordonnée Y
O	0	0,3
A	-0,3	0,3
B	-0,21	0,51
C	0	0,6
D	0,21	0,51
E	0,3	0,3

TABLE 5.21 – Coordonnée de chaque point composant le dispositif expérimental.

Nous effectuons une série d'expériences sur 2 sujets (4 essais pour le premier et 5 pour le second). Nous demandons simplement un positionnement de la main, sans contrainte d'orientation. L'ensemble des

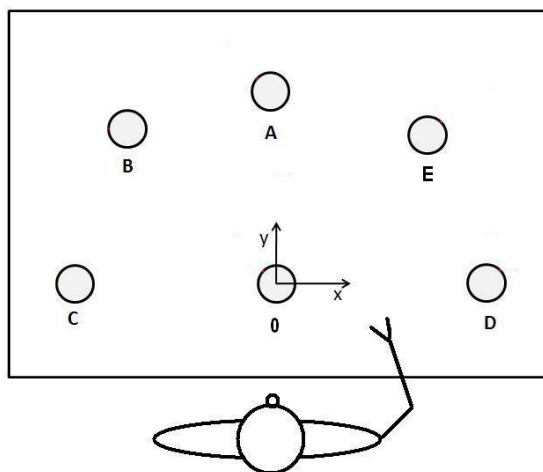


FIGURE 5.44 – Placement des points pour le mouvement en étoile.

trajectoires de la main est disponible dans les annexes D.1. Nous avons choisi de représenter 2 trajectoires fournies par le sujet 1 en exemple dans la figure 5.45. Le tableau 5.22 permet de résumer l'ensemble des mesures de déformation de trajectoire.

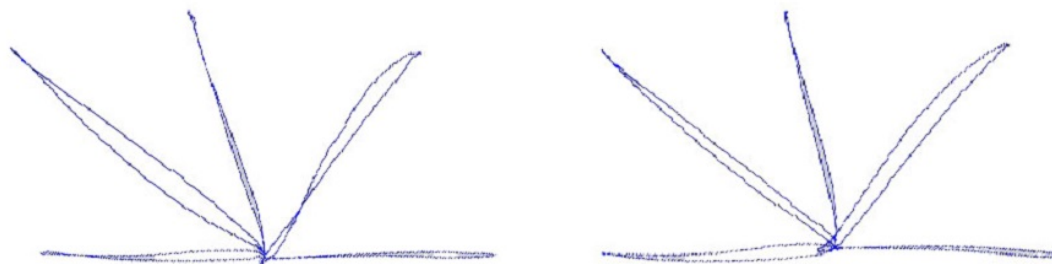


FIGURE 5.45 – Exemple de 2 trajectoires réalisées par le premier sujet.

Nous observons certains mouvements proches de la ligne droite et d'autres qui s'en éloignent davantage. Nous observons que les trajectoires de la main lors de ces mouvements d'aller retour ne sont pas symétriques. Par exemple, le mouvement de 0 à *E* (mouvement 9) réalise une ligne droite tandis que son opposé (le geste allant de *E* à 0 ou mouvement 10) produit une trajectoire courbe.

Nous simulons à présent ce mouvement à l'aide de notre humanoïde. La visualisation des 10 mouvements est disponible dans les figures 5.46, 5.47, 5.48, 5.49, 5.50, 5.51, 5.52, 5.53, 5.54 et 5.55. La trajectoire effectuée par la main est présentée sur le schéma 5.56. Les déformations de chaque trajectoire sont présentées dans le tableau 5.23.

La trajectoire simulée s'écarte de la géodésique. Cet écart est différent pour chaque mouvement avec des index de linéarité allant de 1,63 à 7,11. Si nous comparons nos résultats avec les données expérimentales (voir schéma 5.57), nous pouvons dire que certains mouvements simulés sont acceptables (le 2, 4, 7 et 8), du moins compris dans la dispersion des mesures acquises. D'autres mouvements comme le 1, 5 et 10 sont presque acceptables. Enfin, seul le mouvement 6 dispose d'un écart très grand entre la simulation et l'acquisition.

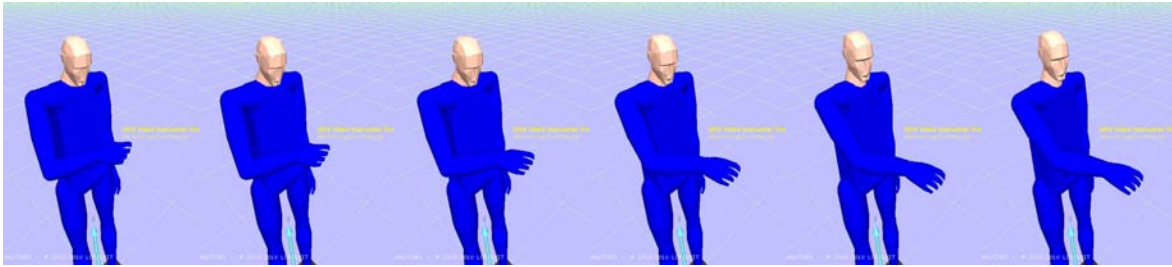


FIGURE 5.46 – Simulation du premier mouvement de la séquence en étoile.

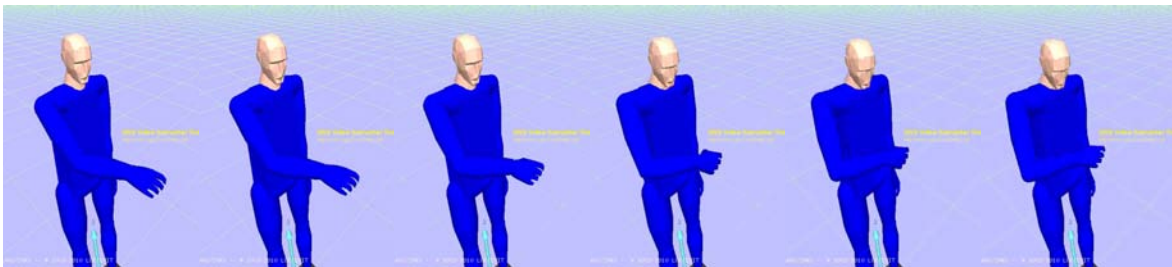


FIGURE 5.47 – Simulation du second mouvement de la séquence en étoile.

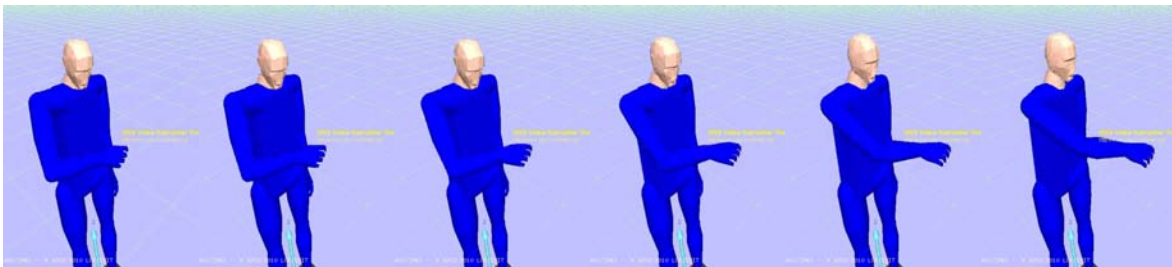


FIGURE 5.48 – Simulation du troisième mouvement de la séquence en étoile.



FIGURE 5.49 – Simulation du quatrième mouvement de la séquence en étoile.



FIGURE 5.50 – Simulation du cinquième mouvement de la séquence en étoile.

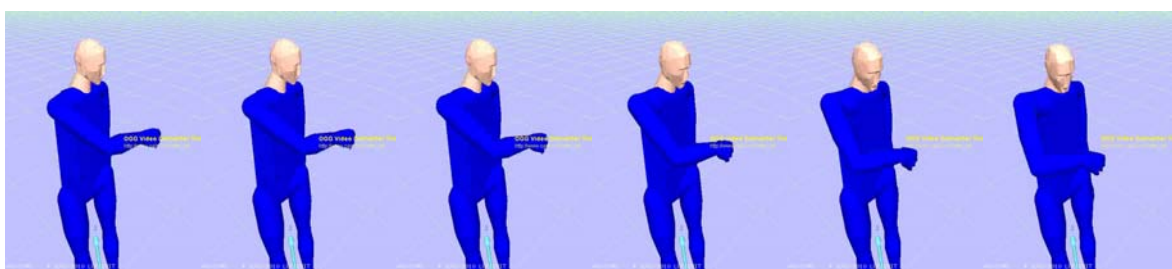


FIGURE 5.51 – Simulation du sixième mouvement de la séquence en étoile.

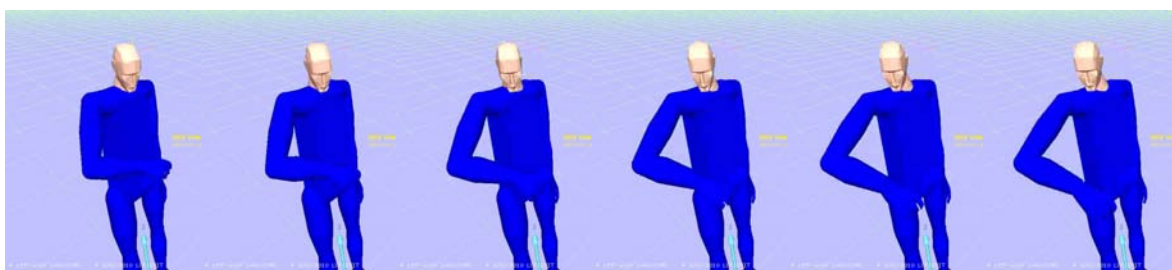


FIGURE 5.52 – Simulation du septième mouvement de la séquence en étoile.

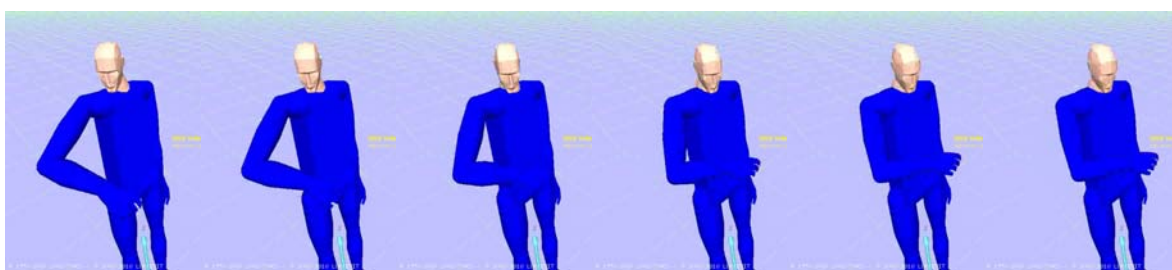


FIGURE 5.53 – Simulation du huitième mouvement de la séquence en étoile.



FIGURE 5.54 – Simulation du neuvième mouvement de la séquence en étoile.

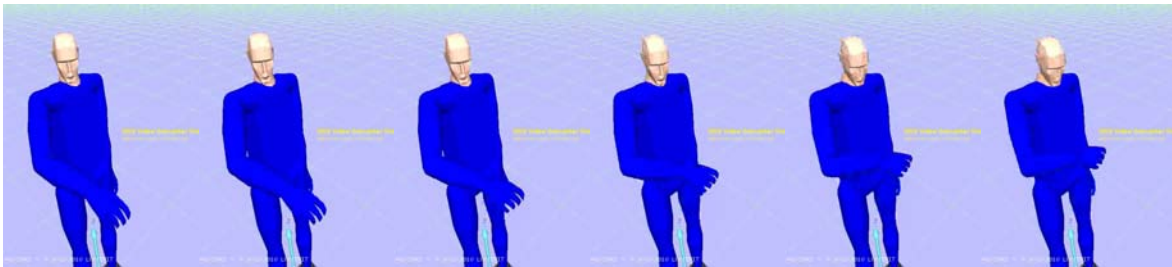


FIGURE 5.55 – Simulation du dixième mouvement de la séquence en étoile.

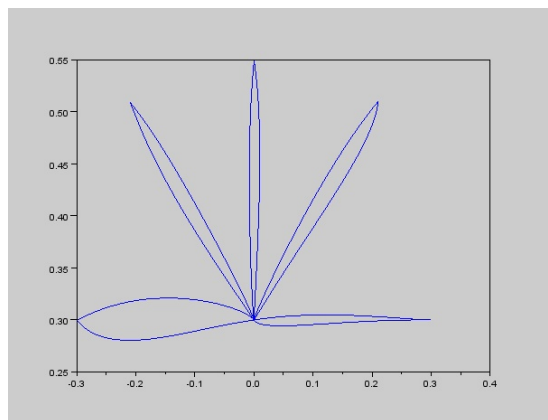


FIGURE 5.56 – Trajectoire simulée de la main en translation.

Mouvement	type	Sujet 1	Sujet 2	Total
1	moyenne	3,53	2,13	2,75
	écart type	0,29	0,64	0,88
2	moyenne	1,57	2,97	2,35
	écart type	0,58	1,05	1,11
3	moyenne	2,51	1,21	1,79
	écart type	0,73	0,84	1,01
4	moyenne	4,18	2,16	3,06
	écart type	1,24	0,86	1,44
5	moyenne	2,05	5,40	3,91
	écart type	0,44	1,26	2,00
6	moyenne	2,92	2,37	2,62
	écart type	1,51	0,59	1,06
7	moyenne	1,77	4,58	3,33
	écart type	0,25	1,11	1,68
8	moyenne	4,30	3,18	3,68
	écart type	4,01	0,46	2,55
9	moyenne	1,80	1,45	1,61
	écart type	0,75	1,00	0,86
10	moyenne	6,37	4,73	5,46
	écart type	1,34	1,08	1,41

TABLE 5.22 – Mesure de déformation LI de trajectoire pour le mouvement en étoile.

Mouvement	LI capturé	écart type	LI simulé
1	2,75	0,88	4,06
2	2,35	1,11	3,31
3	1,79	1,01	3,84
4	3,06	1,44	3
5	3,91	2	6,47
6	2,62	1,06	7,11
7	3,33	1,68	1,63
8	3,68	2,55	1,87
9	1,61	0,86	4,23
10	5,46	1,41	3,75

TABLE 5.23 – Mesure de déformation de la trajectoire de la main pour chaque mouvement composant la séquence en étoile pour la simulation.

Discussion Nous obtenons par la simulation certains mouvements de la main compris dans la dispersion du geste mesuré expérimentalement. Les réglages de l'ensemble de notre modèle ont été effectués sur la base de 4 mouvements (mouvements 3 et 6 avec contrainte de positionnement seule puis contraintes couplées). Notre schéma de contrôle a été développé afin de configurer le mouvement en utilisant très peu de paramètres. Ce choix a un impact sur la génération de mouvements puisque nous n'arrivons pas à reproduire la trajectoire spatiale de la main pour l'ensemble des mouvements. Nous avons pu observer que notre schéma de simulation reproduit la moitié des mouvements réalisés sur cette séquence. D'autres mouvements sont très proches de ceux mesurés lors de nos expérimentations. Finalement, il n'y a véritablement qu'un

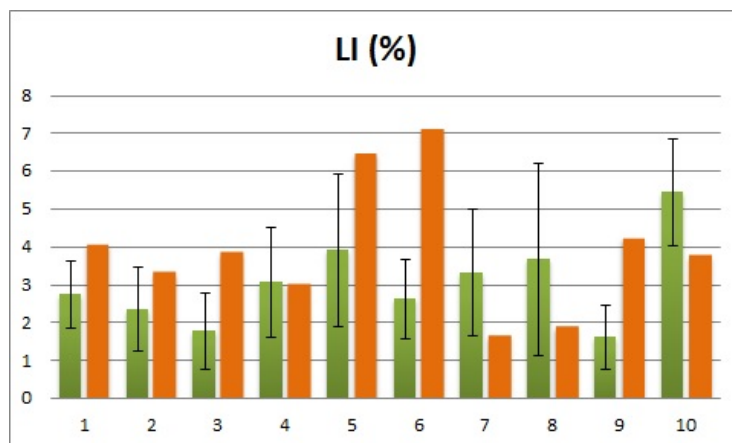


FIGURE 5.57 – Comparaison de la mesure de déformation dans \mathbb{R}^3 entre l’acquisition (en vert) et la simulation (en orange).

geste (le mouvement 6) dont la simulation s’écarte franchement de l’acquisition.

Les réglages adoptés précédemment nous permettent de reproduire une grande variété de mouvements. Ces réglages peuvent ainsi être modifiés afin de s’adapter à ces nouveaux mouvements. L’enrichissement de la base de mouvements peut conduire à affiner davantage ces réglages. Cependant, leurs modifications ne garantissent absolument pas le fait de pouvoir reproduire l’ensemble du mouvement humain.

5.9 Conclusion

Ce dernier chapitre a permis de présenter les outils utilisés, de décrire le processus de réglage et de proposer une validation du mouvement généré.

En premier lieu, nous avons présenté l’outil qui a permis de tester notre schéma de contrôle : la plateforme OLARGE-TMS. Ensuite, nous avons développé une méthode d’imitation du geste humain. Nous avons analysé les données acquises dans l’espace opérationnel dans le chapitre 3. Cependant, nous avons souhaiter connaître les mouvements internes de la chaîne articulée. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur l’orientation des corps capturés (la tête, le buste, le bras, l’avant-bras et la main). Le schéma de rejeu s’appuie sur un modèle cinématique priorisé qui nous permet de contrôler chaque partie du mannequin par une sous-tâche. Notre méthode d’imitation permet à l’humanoïde de faire converger l’orientation de ses corps pour qu’ils correspondent aux orientations capturées. Ainsi, les données capturées permettent d’obtenir l’évolution de la posture du mannequin.

Grâce à cette méthode de rejeu, nous avons repris les données acquises dans le chapitre 3 afin d’analyser, dans l’espace généralisé, deux types de mouvements : le premier contraignant la position de la main et le second ajoutant l’orientation de la main. Pour chacun des cas, nous avons étudié la capacité de déplacement de la chaîne cinématique par le biais des valeurs singulières.

Dans le premier cas (mouvements contraints en position), nous avons observé l’évolution des valeurs singulières à l’aide d’un modèle cinématique global puis avec un modèle cinématique priorisé. Avec le modèle cinématique global, nous avons obtenu un jeu de 6 valeurs singulières allant de 0,3 à 1,6. Cependant, la tâche liée au déplacement du regard rend difficile l’analyse de ces profils puisque celle-ci interfère avec le déplacement de la main en position. Les valeurs singulières reflètent donc la capacité de la chaîne à produire à la fois, le déplacement du regard et de la main. Par conséquent, nous avons préféré analyser les capacités de déplacement de la chaîne à l’aide du schéma priorisé. Nous avons ainsi constaté que les valeurs singulières liées à la translation de la main s’échelonnent entre 0,4 et 1,2, ce qui signifie que l’humanoïde

possède des directions préférentielles pour le déplacement de sa main. L'étude de ces profils à l'aide du modèle cinématique global et priorisé a également mis en avant le fait que la chaîne cinématique n'est jamais en configuration singulière. Les profils d'évolution des valeurs singulières obtenus pour l'ensemble des individus se ressemblent.

Dans le second cas (mouvements contraints en position et orientation), nous avons analysé les mouvements contraignant à la fois la position et l'orientation de la main. Encore une fois, nous avons observé le profil d'évolution des valeurs singulières avec un modèle cinématique global puis avec un schéma priorisé. Les profils d'évolution des valeurs singulières se ressemblent pour l'ensemble des sujets, comme pour l'expérience sans contrainte d'orientation. Ce second constat nous laisse penser que l'évolution des valeurs singulières est caractérisée par la tâche réalisée. Autrement dit, ces profils d'évolution peuvent représenter une signature du geste. Nous avons étudié les valeurs singulières à l'aide des modèles cinématiques, global et priorisé.

Le modèle cinématique global nous a donné un ensemble de 9 valeurs singulières représentant les capacités de déplacement de la chaîne pour le placement de la main et du regard. Afin de déterminer plus spécifiquement la capacité de la chaîne pour déplacer sa main en translation ou en rotation, nous avons travaillé avec le schéma priorisé puisque celui-ci permet de découper le problème en différentes sous-tâches. Ainsi, nous avons obtenu des valeurs singulières allant de 0,4 à 1,2 pour le déplacement en position de la main. Il apparaît à nouveau des directions privilégiées, de la même façon qu'avec le mouvement sans contrainte d'orientation. Pour la rotation de la main, nous obtenons des valeurs singulières s'échelonnant de 1,6 à 2,3. Il y a donc également des directions privilégiées dans le cas de la rotation mais celles-ci sont moins marquées que pour le déplacement en translation. Le calcul du ratio entre la valeur singulière la plus forte et la valeur singulière la plus faible nous confirme cette information. Une étude supplémentaire a ensuite été réalisée en vue d'analyser l'influence de la priorité d'une sous-tâche sur la capacité de l'humanoïde à produire un mouvement. Nous avons pu vérifier que les valeurs singulières chutent avec le niveau de priorité de la sous-tâche. Le conditionnement du couple matrice jacobienne et projecteur devient également moins bon pour le cas de la rotation. En revanche, nous avons noté que celui-ci devient meilleur pour le cas de la translation, ce qui signifie que les directions privilégiées pour le déplacement de la main deviennent de moins en moins marquées au fur et à mesure que la priorité de la sous-tâche chute.

Nous nous servons par la suite des analyses du geste humain dans les espaces opérationnel et généralisé afin de paramétrer notre schéma de génération de mouvements réalistes. En translation, nous avons pu observer dans l'espace opérationnel que les trajectoires spatiales s'éloignent davantage des géodésiques lorsque le mouvement contraint l'orientation de la main. Nous avons proposé l'hypothèse que la rotation de la main pourrait être privilégiée par rapport au déplacement. Dans l'espace généralisé, toujours pour le cas de la translation, nous avons noté que les valeurs singulières chutent lorsque la priorité de la sous-tâche associée au déplacement de la main diminue mais que le conditionnement du couple matrice jacobienne / projecteur devient meilleur. Par conséquent, le filtrage associé à la sous-tâche en translation va davantage déformer le schéma lorsque la priorité de cette sous-tâche va diminuer. Avoir une priorité pour la translation de la main qui soit inférieure à la rotation de la main semble également être une bonne solution dans ce cas-ci.

Par la suite, nous avons paramétré notre schéma de simulation en suivant deux grandes étapes. La première étape consiste à régler le modèle lorsque la main de l'humanoïde est contrainte uniquement en position. Nous nous sommes basés sur l'index de linéarité des mouvements 3 et 6 pour effectuer le réglage. Nous avons alors choisi un réglage qui permet d'obtenir des *LI* proches des acquisitions. Cependant, nous avons pu observer qu'il existe plusieurs réglages compatibles pour générer des mouvements réalistes. Afin de déterminer si ce réglage reste valide pour des mannequins de taille différente, nous avons lancé la simulation avec des mannequins différents dont les tailles sont comprises entre le plus petit et le plus grand sujet capturé. Il apparaît que les mouvements produits par ces différents mannequins restent compris dans la variabilité des gestes acquis.

La seconde étape du processus de réglage vient ajouter une contrainte d'orientation à la main. Cette seconde étape met en avant quelques difficultés auxquelles nous avons été confrontées. Nous devons en

effet respecter les trajectoires spatiales de la main en translation et en rotation. Avec la sous-tâche en translation qui possède une priorité inférieure à la rotation de la main, nous avons obtenu des trajectoires spatiales davantage éloignées des géodésiques de référence, ce qui permet de réaliser un mouvement dans \mathbb{R}^3 conforme aux acquisitions. Pour la rotation de la main, le schéma permet également de nous éloigner des trajectoires de référence. Le réglage du schéma a été réalisé sur les mouvements 3 et 6. Plusieurs réglages permettent de simuler un geste proche des acquisitions. Nous avons alors choisi les réglages qui permettent d’approcher au mieux la trajectoire de la main dans l’espace de la tâche. Concernant l’aspect temporel, la loi temporelle “minimum jerk” est appliquée pour la translation et la rotation de la main. Ce profil de référence permet de reproduire le profil obtenu lors des acquisitions.

Afin de valider notre schéma de génération automatique de mouvements réalistes, nous avons réalisé plusieurs scénarios différents. Dans un premier temps, nous avons testé le schéma de contrôle lors de plusieurs cycles successifs. Le mouvement simulé permet de reproduire des trajectoires spatiales très proches entre elles, que ce soit pour des cycles de mouvements avec et sans contraintes d’orientation. Grâce à cette expérience, nous pouvons voir que les réglages adoptés et les mouvements générés dépendent peu de la posture initiale. En effet, au début de chaque cycle, l’humanoïde adopte une posture qui diffère légèrement de la posture initiale. Cependant, nous avons constaté qu’au bout de plusieurs cycles, les mouvements simulés restent proches en terme de trajectoire spatiale. Il est donc possible de simuler des tâches répétitives avec plusieurs cycles d’une même séquence sans que les résultats soient perturbés.

Enfin, nous avons testé notre schéma de simulation avec de nouvelles expérimentations dans le but de valider son bon fonctionnement qui se mesure par la capacité du système à prédire un mouvement. Les acquisitions, uniquement contraintes en position, nous ont permis d’obtenir une nouvelle base de comparaison. La simulation de cette expérience nous permet d’observer que le schéma de contrôle est capable de prédire une partie des mouvements. Celui-ci ne peut en effet pas prédire l’ensemble des mouvements de cette expérience pour plusieurs raisons. Premièrement, notre schéma est réglé par rapport à deux expériences avec un nombre limité de mouvements. La prise en compte de cette nouvelle expérimentation dans le processus de réglage modifierait la valeur des paramètres et pourrait améliorer le réalisme des mouvements produits. En second, notre hypothèse sur le principe moteur de notre schéma de commande n’est sans doute pas celui qui régit la totalité du geste humain. Cette nouvelle expérience pourrait donc obéir à d’autres principes moteurs puisque la gestuelle humaine est soumise à un ensemble de facteurs internes et externes qui ne sont pas pris en compte dans notre schéma.

Conclusion

Notre étude concernant la génération automatique de mouvements réalistes pour humanoïde est présentée dans ce mémoire. Nous nous sommes attachés aux gestes répétitifs en position assise pour des tâches d'atteinte contraignant à la fois la position et l'orientation de la main. Notre étude s'appuie sur les trajectoires spatiales et les profils temporels adoptés par la main dans l'espace de la tâche ainsi que sur les capacités de déplacement de l'humain. Nous avons décomposé notre travail en cinq parties qui traitent :

1. de l'humain, des modèles robotiques et des études ergonomiques,
2. de la modélisation de l'homme, de la tâche et du mouvement,
3. des différentes expérimentations qui nous ont permis de caractériser le geste humain,
4. du schéma de contrôle que nous avons mis en oeuvre pour générer des mouvements réalistes,
5. de la comparaison des résultats obtenus par la simulation avec les données acquises lors des expérimentations.

Le premier chapitre définit le contexte de cette étude et décrit de façon globale :

- L'être humain et les modélisations existantes. Nous nous appuyons sur l'analyse de l'appareil locomoteur passif. Les articulations de l'humain sont complexes et produisent des mouvements combinés entre elles. C'est notamment le cas de l'épaule, de la colonne vertébrale et du mouvement de pronosupination que nous analysons brièvement. Nous avons également étudié les mannequins numériques pour analyser les différentes représentations de l'humain qui sont utilisées par la communauté scientifique et la modélisation complexe de certains éléments (l'épaule par exemple).
- Le mouvement, humain et robotique. Les mouvements des articulations de l'homme sont connus et décrits dans le domaine médical. Nous avons donc repris ces connaissances afin de synthétiser le fonctionnement des différentes articulations du haut du corps. Nous nous sommes également intéressés aux différentes techniques d'animation qui utilisent soit des méthodes cinématiques, soit dynamiques. Cependant, aucune de ces méthodes ne permet véritablement de simuler l'ensemble de la gestuelle humaine et ne sont généralement valides que pour des cas bien spécifiques. L'animation d'un mannequin numérique peut également se baser sur des données issues de la capture de mouvements, on parle dans ce cas d'imitation du geste ou méthode de rejeu et il apparaît alors des difficultés dues au fait qu'avatar et humain sont différents sur plusieurs points de vue (cinématique, dimensionnel, ...).
- L'évaluation ergonomique. L'analyse et la mesure de contraintes biomécaniques sont des facteurs importants pour caractériser l'ergonomie d'un poste de travail. Nous avons fait un état de l'art sur la façon de mesurer l'inconfort d'un opérateur sur un poste, mesure qui dépend de plusieurs facteurs et notamment d'ordre physiologique. Nous avons pu constater que les mannequins numériques sont souvent couplés à des logiciels de conception assistée par ordinateur. Ces mannequins sont alors utilisés pour prédire l'ergonomie d'un poste futur, le champ de vision d'un opérateur, le volume d'atteinte... Cependant, la simulation du geste humain est imparfaite et les indications données par de tels logiciels ne garantissent pas une mesure fiable du risque d'apparition des troubles musculosquelettiques.

Le second chapitre du document présente notre formulation du problème. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la description d'un poste de travail. Etant donné que nous souhaitons analyser des gestes d'atteinte, nous avons fait le choix de modéliser un poste par une succession de tâches élémentaires. Ces tâches sont caractérisées par la situation initiale et finale des mains dans l'espace opérationnel. Nous avons vu que la description de la main en position peut se réaliser par un vecteur suivant le repère associé à la scène. En revanche, il existe de nombreuses représentations pour caractériser l'orientation de la main. Les angles d'Euler permettent de décrire une orientation à l'aide de 3 paramètres. Cependant, cette représentation fait apparaître des blocages, des singularités. Aussi, nous avons choisi d'utiliser la représentation axe/angle, les quaternions et les matrices de rotation pour l'analyse de la trajectoire de la main dans $SO(3)$.

Par la suite, nous développons le modèle de mannequin que nous utilisons pour ce travail. Cette modélisation permet de fixer dans un premier temps, les longueurs segmentaires, masses et inerties de chacun des corps composant l'humanoïde. Nous décrivons également la modélisation des différentes articulations de celui-ci avec notamment, les amplitudes articulaires maximales et les différentes zones qui permettent de donner un score pour mesurer l'inconfort d'une posture. L'ensemble de ces données est issue de différentes études qui concernent l'anthropométrie et l'ergonomie d'une population.

La troisième partie de ce chapitre décrit la modélisation du mouvement dans \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Dans les deux cas, nous pouvons construire des trajectoires spatiales en utilisant l'interpolation linéaire pour la translation et l'interpolation linéaire sphérique pour la rotation. Ces deux techniques permettent de parcourir les trajectoires à vitesse constante et sont de plus, les chemins les plus courts pour aller d'un point à un autre. Nous définissons également les outils que nous utilisons et qui sont basés sur ces trajectoires géodésiques. En effet, afin de caractériser l'écart entre une trajectoire quelconque et sa géodésique associée, nous utilisons des mesures appelées LI et DI qui dépendent à la fois de cet écart, mais également de la longueur du chemin géodésique. Il s'agit donc d'un ratio qui permet de comparer des écarts entre des trajectoires de longueurs différentes. Ces outils fonctionnent aussi bien dans \mathbb{R}^3 (LI) que dans $SO(3)$ (DI). Il est difficile d'obtenir des outils qui montrent précisément la trajectoire d'un solide en rotation. Pour cela, nous avons développé deux outils. Le premier est constitué d'un ensemble de boîtes orientées, représentant la trajectoire réelle et la trajectoire géodésique de référence. Il est alors possible de visualiser la transformation géométrique nécessaire pour passer d'une boîte à sa boîte de référence associée. Le second outil permet de montrer la direction de déformation de l'orientation ayant l'écart le plus important. Ce dernier ne permet pas de montrer une évolution de l'écart mais indique seulement la direction de l'écart maximal.

Le troisième chapitre de ce manuscrit permet de faire un état de l'art du mouvement humain et de décrire les expérimentations utilisant la capture de mouvements nécessaires à notre étude. Ces captures composées de 7 mouvements se basent sur deux expériences. La première expérience permet de contraindre la position de la main, la seconde expérience contraint la position et l'orientation de celle-ci. Nous avons analysé ces captures dans l'espace de la tâche dans les différents sous-espaces considérés. Pour chacun d'entre eux, nous avons étudié la trajectoire spatiale et le profil temporel. Nous avons également analysé la synchronisation qui existe entre position et orientation.

Pour la première expérience, nous avons pu constater que la trajectoire spatiale de la main dans \mathbb{R}^3 ne suit pas une ligne droite et possède un index de linéarité différent selon le mouvement. Nous avons pu relever le LI et les écarts type correspondant pour chaque sujet et pour l'ensemble des captures. Ces mesures nous servent par la suite à régler notre schéma de contrôle pour le déplacement en position de la main. Concernant l'aspect temporel, nous avons pu noter que la loi du "minimum jerk" correspond au déplacement de la main dans le temps.

Pour la seconde expérience, celle qui contraint la position et l'orientation de la main, nous avons dans un premier temps analysé indépendamment la trajectoire spatiale de la main dans \mathbb{R}^3 puis $SO(3)$. La translation possède des index de linéarité pour chaque mouvement qui sont supérieurs à ceux observés pendant la première expérience. Certains mouvements s'éloignent davantage des géodésiques que d'autres.

Nous avons également relevé les LI et les écarts type associés pour chaque sujet et pour l'ensemble des captures. Concernant la trajectoire de la main en rotation, nous avons relevé les DI et les différents écarts type associés à chaque mouvement. En observant l'évolution de l'orientation, nous avons pu observer que celle-ci évolue différemment suivant chaque mouvement. Ces évolutions vont servir par la suite à la validation des gestes simulés. Si nous comparons les trajectoires dans les deux espaces, LI et DI , nous avons pu voir que dans certains cas, la translation de la main est privilégiée par rapport à la rotation et inversement. Il est possible qu'en fonction des mouvements, l'être humain cherche à privilégier l'un des aspects en vue de réaliser le geste.

Le profil temporel lors de nos acquisitions, que l'on soit dans \mathbb{R}^3 ou $SO(3)$ suit une loi lisse qui est semblable à celle obtenue par minimisation du jerk. Nous confirmons cette information dans nos essais. Nous étudions également la synchronisation entre les mouvements de translation et de rotation de la main. Il apparaît que les mouvements en translation et en orientation démarrent et terminent en même temps. Nous avons cependant noté que la rotation de la main possède, dans certains cas, une dynamique plus rapide que celle donnée par le minimum jerk.

La quatrième partie du document décrit les outils mis en place pour générer automatiquement un mouvement réaliste. Le schéma de génération de mouvements automatiques que nous avons mis au point utilise un modèle cinématique associé à un système de priorisation. Ce système de hiérarchisation des tâches, qui utilise une pile de tâche, permet de découper le problème global (placement du regard, déplacement de la main en translation, rotation, gestion des butées, ...) en plusieurs sous-tâches. Le modèle cinématique calcule une solution locale, pondérée et filtrée. La prise en compte d'une pondération nous permet d'inclure les inerties des masses constituant notre mannequin et de recréer artificiellement des effets dynamiques. Le filtrage, quant à lui, nous permet d'adapter la solution de notre problème en fonction de la manipulabilité de la chaîne articulée. Nous décrivons également dans cette partie les différents calculs associés aux sous-tâches qui se composent de contraintes égalité (placement du regard et déplacement de la main) dans l'espace de la tâche, des contraintes inégalité (respect des butées articulaires et évitement de l'auto-collision) ainsi qu'un gradient d'ajustement vers une posture de confort dans l'espace des liaisons.

Dans la cinquième partie du document, nous présentons dans un premier temps l'outil OLARGE-TMS que nous utilisons. Il utilise notre schéma de génération automatique de mouvements réalistes et permet la visualisation du geste simulé en trois dimensions. Par la suite, nous détaillons une méthode de rejeu. Grâce à cette méthode, nous allons pouvoir analyser les mouvements capturés dans l'espace généralisé. L'imitation du geste humain utilise notre schéma priorisé afin de faire converger la posture de l'humanoïde vers la posture acquise.

Dans un second temps, nous avons repris les données acquises afin d'étudier les capacités de déplacement de la chaîne, notamment au travers des valeurs singulières. Nous avons pu observer pour chacune des expériences que le mannequin n'est jamais en configuration singulière. Les profils d'évolution des valeurs singulières sont très proches pour l'ensemble des sujets, ce qui peut signifier que ces profils sont une signature de la tâche réalisée. L'analyse de ces σ_i permet de borner leurs valeurs afin d'obtenir une base de réglage pour notre schéma. Nous avons également étudié le comportement des valeurs singulières en fonction de la priorité des sous tâches pour le déplacement de la main, en rotation et en translation. Nous avons vérifié dans tous les cas, que les valeurs singulières chutent avec le niveau de priorité. La sous-tâche en translation de la main possède des directions privilégiées puisque le rapport entre la valeur singulière la plus haute et la valeur singulière la plus basse est de 3. Ce rapport diminue au fur et à mesure que la priorité chute, ce qui signifie que les directions privilégiées deviennent moins marquées. Concernant la rotation de la main, ce rapport est plus faible (environ 1,4) mais tend à augmenter (jusqu'à 2,3) lorsque le niveau de priorité chute. L'ensemble de ces observations nous permet de mettre en place un processus de réglage pour notre schéma.

Dans un troisième temps, nous décrivons le processus de réglage choisi. Nous commençons par régler le schéma en réglant uniquement la translation de la main. Ce premier réglage va s'effectuer en s'appuyant sur les données expérimentales obtenues dans le troisième chapitre. Par la suite, nous avons ajouté une

contrainte d'orientation afin de déterminer le réglage pour la rotation de la main. Etant donné que les trajectoires dans \mathbb{R}^3 sont plus éloignées de la géodésique lorsqu'une contrainte d'orientation de la main est imposée, nous avons choisi de reproduire ce phénomène en donnant une priorité inférieure à la sous-tâche en translation par rapport à la sous-tâche en rotation.

Lors de la simulation de nos gestes, nous nous sommes basés sur les mouvements 3 et 6 pour paramétrer le modèle. Nous avons pu voir qu'il n'existe pas un réglage unique pour obtenir des trajectoires réalistes, il existe en effet une plage de réglages. Nous avons pu faire une première vérification des gestes simulés en regardant le sens et la direction des déformations de chaque mouvement dans \mathbb{R}^3 et $SO(3)$. Nous avons pu constater qu'en translation, le sens de déformation est toujours compatible avec les sens observés lors des acquisitions. En revanche, la direction de déformation maximale n'est pas toujours la même en rotation. Si les déformations ont des amplitudes comparables à l'humain et comprises dans la variabilité du geste, il n'en est pas de même pour la direction de déformation. En d'autres termes, la trajectoire de la main dans l'espace opérationnel n'est pas la même que celle capturée. Concernant le profil temporel, notre schéma est capable de reproduire le profil de type "minimum jerk" imposé et correspond au profil relevé lors de nos expérimentations.

Enfin, nous avons choisi de valider les mouvements générés par le biais de plusieurs expériences. Dans un premier temps, nous avons simulé des gestes avec des tailles de mannequins différentes. Cette première validation montre que le schéma produit toujours des gestes réalistes pour des tailles de mannequins comprises entre la personne capturée la plus petite et la personne capturée la plus grande. La seconde validation permet de tester un cycle de plusieurs séquences. Nous avons pu voir que notre schéma peut simuler des tâches répétitives et que les réglages adoptés précédemment permettent de conserver des quantités de déformation comprises dans la dispersion du geste humain. Enfin, nous avons réalisé, sur une base nouvelle d'expérimentation, un nouveau mouvement dans le plan horizontal. La simulation du geste nous a donné de bons résultats sur certains mouvements, en terme de direction et d'amplitude de déformation et sur l'aspect temporel. Cependant, tout comme pour les expériences qui nous ont permis de régler le modèle, nous ne pouvons pas reproduire de manière exacte l'ensemble des mouvements qui caractérisent cette nouvelle séquence.

Cette étude décrit un schéma de génération automatique de mouvements basé sur un modèle cinématique et un système de priorisation. Notre schéma permet de produire un mouvement qui minimise un coût à la fois dans l'espace de la tâche (à l'aide des géodésiques données en références) et dans l'espace des liaisons (grâce à l'action du filtre). L'intérêt de ce travail porte sur le fait que le geste humain, dans les cas particuliers que nous avons étudiés au sein de ce manuscrit, peut être en partie expliqué à partir de concepts liés à la manipulabilité. L'étude de la manipulabilité à elle seule nous permet d'expliquer une certaine variété de mouvements dans l'espace \mathbb{R}^3 . Le mouvement de rotation de la main est plus complexe et notre modèle ne permet pas de reproduire à l'identique les résultats acquis.

La première difficulté rencontrée lors de ce travail a été l'analyse du mouvement humain et la définition des outils permettant le traitement des données. L'étude portant sur la translation et la rotation de la main peut se faire suivant $SE(3)$. Cependant, il convient dans ce cas de définir une métrique commune pour associer translation et rotation. Nous avons préféré décomposer le problème en deux parties distinctes et indépendantes : \mathbb{R}^3 et $SO(3)$.

La seconde difficulté majeure de ce travail porte sur la conception du schéma de génération de mouvements réalistes. Nous devons à la fois réaliser la tâche imposée, mais nous avons également à prendre en compte le placement du regard, introduire un gradient afin de garder l'humanoïde dans une posture réaliste et inclure des contraintes pour respecter l'amplitude articulaire et éviter l'auto-collision. La paramétrisation du modèle est importante et il a fallu choisir des réglages parmi un ensemble de solutions acceptables.

Ce travail laisse apparaître de nouvelles perspectives pour l'étude de la gestuelle humaine. En effet, le schéma pourrait s'étendre à de nouveaux scénarii que nous développons sur les quatre points suivants :

1. **L'amélioration du schéma de commande et son réglage.** L'utilisation de méthodes d'identifi-

cations de paramètres de réglages pourrait améliorer le réalisme du geste simulé. De même, l'extension des essais sur la base d'expérimentations nouvelles pourrait permettre la simulation de nouveaux gestes et donc, étendre le domaine d'application du schéma de contrôle. Enfin, une cartographie pourrait être établie pour que le schéma de génération de mouvements réalistes adopte automatiquement les meilleurs réglages en fonction de la posture du mannequin et du geste à réaliser.

2. **L'analyse et la génération de mouvements "corps-complet"**. Nous utilisons uniquement la partie supérieure du corps. Il serait intéressant de connaître les mouvements produits lorsque les sujets sont debout. S'ajouteraient au modèle des sous-tâches de maintien de l'équilibre (par le biais du pilotage du centre de masse), des contraintes de positionnement des pieds et du buste. Les chaînes articulées deviendraient également plus complexes. D'autres questions pourraient concerner la prise en compte de critères mettant en jeu l'ensemble de la chaîne articulée ou seulement une de ses parties (la manipulabilité du bras, par exemple).
3. **Les mouvements avec transport d'objet**. Les tâches d'atteinte peuvent être réalisées avec ou sans charge transportée par les mains. Notre schéma de commande suffirait-il à reproduire une variété de geste lorsque qu'une masse non nulle est accrochée à la main, y compris si nous restons dans le plan horizontal? Un modèle dynamique pourrait-il apporter de meilleures solutions dans ce cas précis?
4. **La prise de pièces**. Le modèle de génération automatique de mouvements réalistes peut-il s'étendre à d'autres tâches que la simple atteinte de points? Par exemple, notre modèle serait-il capable de prédire des gestes avec une prise de pièce nécessitant une manipulation?

Ce travail ouvre ainsi de nouvelles perspectives dans le développement de schéma de simulation du geste humain. La manipulabilité et la minimisation des coûts dans l'espace de la tâche et dans l'espace des articulations est une voie qui permet d'expliquer un certain nombre de mouvements naturels.

Bibliographie

- [Albert 66] A. Albert & R. W. Sittler. *A method for computing least squares estimators that keep up with the data*. Journal of SIAM Control Serie A, vol. 3, no. 3, pages 384–417, 1966.
- [Albrecht 11] S. Albrecht, K. Ramirez-Amaro, F. Ruiz-Ugalde, D. Weikersdorfer, M. Leibold, M. Ulbrich & M. Beetz. *Imitating human reaching motions using physically inspired optimization principles*. 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Bled, Slovenia, 2011.
- [Alexander 97] R. M. Alexander. *A minimum energy cost hypothesis for human arm trajectories*. Biological Cybernetics, vol. 76, pages 97–105, 1997.
- [ANACT 07] ANACT. *L’approche économique des TMS : intégrer la prévention à la performance*. Rapport technique, Agence Nationale pour l’Amélioration des Conditions de Travail, Décembre 2007.
- [Aptel 00] M. Aptel, S. Faraudie, L. Tronchet & J. J. Atain-kouadio. *OREGE : Un outil simple d’évaluation des facteurs de risque biomécaniques de TMS du membre supérieur*. Rapport technique, Institut National de Recherche et de Sécurité, Novembre 2000.
- [Army 88] U.S. Army. *Anthropometry and mass distribution for human analogues, Military male aviators*. Corporate author Naval biodynamics LAB New Orleans LA, vol. 1, 1988.
- [Arrichiello 09] F. Arrichiello, S. Chiaverini, P. Pedone, A. A. Zizzari & G. Indiveri. *The null-space based behavioral control for non-holonomic mobile robots with actuators velocity saturation*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, May 2009.
- [Atkeson 85] C. G. Atkeson & J. M. Hollerbach. *Kinematic features of unrestrained arm movements*. Journal of Neuroscience, vol. 5, pages 2318–2330, 1985.
- [Baerlocher 01] P. Baerlocher. *Inverse kinematics techniques for the interactive posture control of articulated figures*. PhD thesis, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.
- [Barlier 03] C. Barlier & B. Poulet. Memotech - génie mécanique. Casteilla, 2003.
- [Barr 92] A. H. Barr, B. Currin, S. Gabriel & J. F. Hughes. *Smooth interpolation of orientations with angular velocity constraints using quaternions*. ACM Computer Graphics, vol. 26, no. 2, pages 313–320, 1992.
- [Bayle 01] B. Bayle, J. Fourquet & M. Renaud. *Manipulability analysis for mobile manipulators*. ICRA 2001, pages 1251–1256, 2001.
- [Belta 02] C. Belta & V. Kumar. *An SVD-based projection method for interpolation on $SE(3)$* . IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 18, no. 3, pages 334–345, Juin 2002.

- [Ben Gal 02] I. Ben Gal & J. Bukchin. *The ergonomic design of workstations using virtual manufacturing and response surface methodology*. IIE Transactions, vol. 34, pages 375–391, 2002.
- [Ben-Israel 03] A. Ben-Israel & T. Greville. *Generalized inverses : theory and applications*. CMS books in mathematics, Springer, 2003.
- [Bennis 02a] F. Bennis, P. Weger & S. Caro. *Etat de l’art de la conception robuste de mécanismes*. Proceeding de la journée AIP-PRIMECA sur les méthodes non déterministes en conception intégrée, 2002.
- [Bennis 02b] N. Bennis & A. Roby-Brami. *Coupling between reaching movement direction and hand orientation for grasping*. Experimental Brain Research, vol. 952, pages 257–267, 2002.
- [Bernard 97] B. P. Bernard. *A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity and low back*. Rapport technique, U.S. department of health and human services, Juillet 1997.
- [Bernstein 67] N. A. Bernstein. *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press, Oxford, 1967.
- [Biess 07] A. Biess, D. G. Liebermann & T. Flash. *A computational model for redundant human three-dimensional pointing movements : Integration of independent spatial and temporal motor plans simplifies movement dynamics*. Journal of Neuroscience, vol. 27, no. 48, pages 13045–13064, Novembre 2007.
- [Bingham 08] G. P. Bingham, K. Hughes & M. Mon-Williams. *The coordination patterns observed when two hands reach-to-grasp separate objects*. Experimental Brain Research, vol. 184, pages 283–293, 2008.
- [Bluteau 08] J. Bluteau, S. Coquillard, Y. Payan & E. Gentaz. *Haptic guidance improves the visuo-manual tracking of trajectories*. Journal PLoS ONE, vol. 3, no. 3, pages 1–7, 2008.
- [Boulic 94] R. Boulic, R. Mas & D. Thalmann. *Inverse kinetics for center of masse position control and posture optimization*. European Workshop on Combined Real and Synthetic Image Processing for Broadcast and video Production, 1994.
- [Boulic 96] R. Boulic & R. Mas. *Hierarchical kinematic behaviors for complex articulated figures*. Interactive Computer Animation, Prentice Hall, pages 40–70, 1996.
- [Brenner 09] E. Brenner & J. B. J. Smeets. *Modifying one’s hand’s trajectory when a moving target’s orientation changes*. Experimental Brain Research, vol. 196, pages 375–383, 2009.
- [Buss 01] S. R. Buss & J. P. Fillimore. *Spherical averages and applications to spherical splines and interpolation*. ACM Transactions on Graphics, vol. 20, no. 2, pages 95–126, Avril 2001.
- [Chadwick 89] J. E. Chadwick, D. R. Haumann & R. E. Parent. *Layered construction for deformable animated characters*. Computer Graphics, vol. 23, no. 3, pages 243–252, 1989.
- [Chaffin 97] D. B. Chaffin. *Development of computerized human static strength simulation model for job design*. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 7, no. 4, pages 305–322, 1997.

- [Chaffin 99] D. B. Chaffin, J. Faraway, C. Wooley, Y. Wang & W. Park. *Simulating industrial reach motions for biomechanical analyses*. IERC 99, 1999.
- [Chaffin 06] D. B. Chaffin, G. B. J. Andersson & B. J. Martin. Occupational biomechanics. John Wiley and Sons, New Jersey, Canada, 2006.
- [Chan 93] T. F. Chan & R. V. Dubey. *A weighted least-norm solution based scheme for avoiding joint limits for redundant manipulators*. IEEE Internationale Conference on Automatics and Automation, vol. 3, pages 395–402, 1993.
- [Chandler 75] R. F. Chandler, C. E. Clauser, J. T. MacConville, H. M. Reynolds & J. W. Young. *Investigation of inertial properties of the human body*. Rapport technique, Wrieth-Patterson Air Force Base, 1975.
- [Chaumette 01] F. Chaumette & E. Marchand. *A redundancy-based iterative approach for avoiding joint limits : application to visual servoing*. IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 17, no. 5, pages 719–730, Octobre 2001.
- [Choe 04] S. B. Choe & J. J. Faraway. *Modeling head and hand orientation during motion using quaternions*. Society of Automotive Engineers, 2004.
- [Cloutier 12] A. Cloutier. *Sensitivity analysis of performance on reach tasks considering joint angle and link length variability*. PhD thesis, University Honors College, Texas Tech University, USA, 2012.
- [Craig 86] J. J. Craig. Introduction to robotics : mechanics and control. Addison Wesley, 1986.
- [Cuijpers 04] R. H. Cuijpers, J. B. J. Smeets & E. Brenner. *On the relation between object shape and grasping kinematics*. Journal of Neuroscience, vol. 91, pages 2598–2606, 2004.
- [Dam 98] E. B. Dam, M. Koch & M. Lillholm. *Quaternions, interpolation and animation*. Rapport technique, University of Copenhagen, Department of computer science, Juillet 1998.
- [Datas 10] A. Datas, J. Fourquet & P. Chiron. *On geodesic paths and least-cost motions for human-like tasks*. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO); Tianjin, Chine, pages 1025–1031, Décembre 2010.
- [Datas 11] A. Datas, J. Fourquet & P. Chiron. *On least-cost path for realistic simulation of human motion*. First International Symposium on Digital Human Modeling (DHM); Lyon, France, Juin 2011.
- [Datas 12a] A. Datas, P. Chiron & J. Fourquet. *On singukar values decomposition and pattern for human motion analysis and simulation*. 17th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR); Miedsysdroje, Pologne, Août 2012.
- [Datas 12b] A. Datas, P. Chiron & J. Fourquet. *A singular values decomposition and pattern for human motion analysis and simulation*. IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV); Guangzhou, Chine, Décembre 2012.
- [Delmia 13] Delmia. *Delmia Ergonomics Specialists*. Dassault Systèmes (<http://www.3ds.com/products/delmia/products/ergonomics-specialists/ergonomics-analysis/>), 2013.
- [Denavit 55] J. Denavit & R. S. Hartenberg. *A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices*. Journal of Applied Mechanics, vol. 23, pages 215–221, 1955.

- [Desmurget 97] M. Desmurget, M. Jordan, C. Prablanc & M. Jeannerod. *Constrained and unconstrained movements involve different control strategies*. Journal of Neurophysiology, vol. 77, no. 3, pages 1644–1650, 1997.
- [Desmurget 98] M. Desmurget, H. Grea & C. Prablanc. *Final posture of the upper limb depends on the initial position of the hand during prehension movements*. Experimental Brain Research, vol. 119, pages 511–516, 1998.
- [Doty 92] K. L. Doty. *An essay on the application of weighted generalized-inverses in robotics*. 5th Conference on Recent Advances in Robot, 1992.
- [Drillis 66] R. Drillis & R. Contini. *Body segment parameters*. O and P Library, Artificial Limbs, vol. 8, no. 1, pages 44–66, 1966.
- [Drury 87] C. G. Drury. *A biomechanical evaluation of the repetitive motion injury potential of industrial jobs*. Seminary of Occupational Medecine, vol. 2, no. 1, pages 41–47, 1987.
- [Dufour 05] M. Dufour & M. Pillu. *Biomécanique fonctionnelle; membres - tête - tronc*. Editions Masson, Paris, 2005.
- [Eltayeb 09] S. Eltayeb, J. B. Staal & A. Hassan. *Work related risk factors for neck, shoulder and arms complaints : a cohort study among dutch computer office workers*. Journal of Occupational Rehabilitation, vol. 19, no. 4, pages 315–322, 2009.
- [Engelbrecht 01] S. A. Engelbrecht. *Minimum principles in motor control*. Journal of Mathematical Psychology, vol. 45, pages 497–542, 2001.
- [Escande 08] A. Escande, P. Evrard, A. Kheddar, N. Mansard, S. Miossec, O. Stasse & K. Yokoi. *Travaux en évitement de collision au JRL-Japon*. Présentation aux 3ème journées de la robotique humanoïde; Paris, France; 13-14 mai, 2008.
- [Fan 06] J. Fan, J. He & S. I. H. Tillery. *Control of the hand orientation and arm movement during reach and grasp*. Experimental Brain Research, vol. 171, pages 283–296, 2006.
- [Fillatreau 13] P. Fillatreau, J. Fourquet, R. Le Bolloc’h, S. Cailhol, A. Datas & B. Puel. *Using virtual reality and 3D industrial numerical models for immersive interactive checklists*. Computers in Industry, 2013.
- [Fisher 88] W. D. Fisher & M. S. Mujtaba. *Minimum ratio-locked profile times for robot trajectories*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pages 1054–1060, 1988.
- [Flanagan 93] J. R. Flanagan, D. J. Ostry & A. G. Feldman. *Control of trajectory modifications in target-directed reaching*. Journal of Motor Behavior, vol. 25, no. 3, pages 140–152, 1993.
- [Flash 85] T. Flash & N. Hogan. *The coordination of arm movements : an experimentally confirmed mathematical model*. Journal of Neuroscience, vol. 5, no. 7, pages 1688–1703, 1985.
- [Gelfand 00] I. M. Gelfand & S. V. Fomin. *Calculus of variations*. Dover, 2000.
- [Golub 83] G. Golub & C. F. Van Loan. *Matrix computations*. Johns Hopkins Studies in Mathematical Sciences, 1983.
- [Goussous 09] F. Goussous, T. Marler & K. Abdel-Malek. *A new methodology for human grasp prediction*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 39, no. 2, pages 369–380, Mars 2009.

- [Grandjean 83] E. Grandjean, W. Hunting & M. Piderman. *VDT workstation design : preferred settings and their effects*. Human Factors, vol. 25, pages 161–175, 1983.
- [Grea 00] H. Grea, M. Desmurget & C. Prablanc. *Postural invariance in three-dimensional reaching and grasping movements*. Experimental Brain Research, vol. 134, pages 155–162, 2000.
- [Guigon 07] E. Guigon, P. Baraduc & M. Desmurget. *Computational motor control : redundancy and invariance*. Journal of Neurophysiology, vol. 97, no. 1, pages 331–347, 2007.
- [Guigon 09] Emmanuel Guigon. Computational and neural principles for human motor control. Hdr, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2009.
- [Hamilton 44] W. R. Hamilton. *On quaternions, or on a new system of imaginaries in algebra*. Philosophical magazine, 1844.
- [Hanavan 64] E. Hanavan. *A mathematical model of the human body*. Rapport technique, Behavioral sciences laboratory, Octobre 1964.
- [Haption 13] Haption. *Société spécialisée dans la conception de systèmes à retour d'effort*. <http://www.haption.com/site/index.php/fr>, 2013.
- [Hart 94] J. C. Hart, G. K. Francis & L. H. Kauffman. *Visualizing quaternion rotation*. ACM Transactions on Graphics, vol. 13, no. 3, pages 256–276, Juillet 1994.
- [Hatze 80] H. Hatze. *A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropometric segments*. Journal of Biomechanics, vol. 13, pages 833–843, 1980.
- [Hatze 05] H. Hatze. *Parameter identification for human body segment models*. Theoretical Issues in Ergonomics Science, vol. 6, no. 3-4, pages 331–334, 2005.
- [Herrb 12] M. Herrb. *GDHE - Graphic Display for Hilare Experiments*. Rapport technique, CNRS - LAAS, 2012.
- [Hesse 09] C. Hesse & H. Deubel. *Changes in grasping kinematics due to different start postures of the hand*. Journal of Human Movement Science, vol. 28, no. 4, pages 415–436, 2009.
- [Hogfors 91] C. Hogfors, B. Peterson, G. Sigholm & P. Herberts. *Biomechanical model of the human shoulder joint*. Journal of Biomechanics, vol. 24, pages 699–709, 1991.
- [Hue 08] V. Hue, J. Fourquet & P. Chiron. *On realistic human motion simulation for virtual manipulation tasks*. In 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pages 167–172, Décembre 2008.
- [Huynh 09] D. Q. Huynh. *Metrics for 3D rotations : comparison and analysis*. Journal of Mathematical Imaging and Vision, vol. 35, no. 2, pages 155–164, 2009.
- [Jensen 78] R. K. Jensen. *Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method*. Journal of Biomechanics, vol. 11, pages 349–358, 1978.
- [Juang 09] C. Juang, C. Chang, J. Wu & D. Lee. *Computer vision-based human body segmentation and posture estimation*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 39, no. 1, pages 119–133, Janvier 2009.

- [Jung 10] E. S. Jung & Y. Shin. *Two-handed human reach prediction models for ergonomic evaluation*. Human factors and ergonomics in manufacturing and service industries, vol. 20, no. 3, pages 192–201, 2010.
- [Kaminski 86] T. R. Kaminski & A. M. Gentile. *Joint control strategies and hand trajectories in multijoint pointing movements*. Journal of Motor Behavior, vol. 18, no. 3, pages 261–278, 1986.
- [Kaneko 04] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi & T. Isozumi. *Humanoid robot HRP-2*. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, L. A., 2004.
- [Kanoun 09] O. Kanoun. *Contribution à la planification de mouvement pour robots humanoïdes*. PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 2009.
- [Kapandji 04] A. I. Kapandji. Physiologie articulaire tome 3 : tronc et rachis (5eme édition). Edition Maloine, 2004.
- [Kapandji 05] A. I. Kapandji. Physiologie articulaire tome 1 : membre supérieur (6eme édition). Edition Maloine, 2005.
- [Kelso 79] J. A. S. Kelso, D. L. Southard & D. Goodman. *On the coordination of two-handed movements*. Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 5, no. 2, pages 229–238, 1979.
- [Keyserling 93] W. M. Keyserling, M. Brouwer & B. A. Silverstein. *A checklist for evaluating ergonomic risk factors resulting from awkward postures of the legs, trunk and neck*. Industrial Ergonomics, vol. 9, pages 283–301, 1993.
- [Kiss 02] S. Kiss. *Computer animation for articulated 3D characters*. Rapport technique, Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science (EEMCS), Octobre 2002.
- [Kremer 08] V. E. Kremer. *Quaternions and SLERP*. Seminar on Character Animation, 2008.
- [Ku 08] K. K. K. Ku, R. Bradbeer, K. Lam & L. Yeung. *Exploration for novel uses of air muscles as hydraulic muscles for underwater actuator*. MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, pages 1–6, 2008.
- [Kuffner 02] J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba & H. Inoue. *Self-collision detection and prevention for humanoid robots*. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation; Washington DC, USA ; May, pages 2265–2270, 2002.
- [Kuffner 04] J. J. Kuffner. *Effective sampling and distance metrics for 3D rigid body path planning*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3993–3998, 2004.
- [Kulpa 05] R. Kulpa. *Adaptation interactive et performante des mouvements d’humanoïdes synthétiques : aspects cinématique, cinétique et dynamique*. PhD thesis, INSA de Rennes, 2005.
- [Lacquaniti 82] F. Lacquaniti & J. F. Soechting. *Coordination of arm and wrist motion during a reaching task*. Journal of Neuroscience, vol. 2, no. 4, pages 399–408, 1982.
- [Ladeveze 10] N. Ladeveze. *Apport des méthodes de planification automatique dans les simulations interactives d’industrialisation et de maintenance en réalité*

- virtuelle*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 19 avril 2010.
- [Le Lionnais 05] F. Le Lionnais, A. Bouvier & M. Georges. Dictionnaire des mathématiques. Quadrige, 2005.
- [Lee 09] S. Lee, E. Sifakis & D. Terzopoulos. *Comprehensive biomechanical modeling and simulation of the upper body*. ACM Transactions on Graphics, vol. 28, no. 4, pages 1–17, 2009.
- [Liégeois 77] A. Liégeois. *Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 7, no. 12, pages 868–871, Décembre 1977.
- [Lindsay 01] N. Lindsay. *A report describing the development of a three-dimensional biomechanical model of the human shoulder complex*. Rapport technique, Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University, Australia, 2001.
- [Liu 02] C. K. Liu & Z. Popovic. *Synthesis of complex dynamic character motion from simple animations*. ACM Transactions on Graphics - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, vol. 21, no. 3, pages 408–416, 2002.
- [Lu 08] J. Lu & M. J. Wang. *Automated anthropometric data collection using 3D whole body scanners*. Expert Systems with Applications, vol. 35, no. 1-2, pages 407–414, 2008.
- [Lu 10] J. Lu, M. J. Wang & R. Mollard. *The effect of arm posture on the scan-derived measurements*. Applied Ergonomics, vol. 41, pages 236–241, 2010.
- [Maciejewski 88] A. A. Maciejewski & C. A. Klein. *Numerical filtering for the operation of robotic manipulators through kinematically singular configurations*. Journal of Robotic Systems, vol. 5, no. 6, pages 527–552, 1988.
- [Maciejewski 90] A. A. Maciejewski. *Motion simulation : Dealing with the ill-conditioned equation of motion for articulated figures*. IEEE Computer Graphic Applications, vol. 10, no. 3, pages 63–71, 1990.
- [Mansard 05] N. Mansard & F. Chaumette. *Enchaînement de tâches en asservissement visuel : application à l'évitement des butées articulaires*. Congrès des jeunes chercheurs en Vision par ordinateur, ORASIS 2005, Clermont-Ferrand, 2005.
- [Mansard 07] N. Mansard & F. Chaumette. *Task sequencing for high level sensor-based control*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, no. 1, pages 60–72, 2007.
- [Marchand 96] E. Marchand, F. Chaumette & A. Rizzo. *Evitement des butées articulaires et des singularités internes en asservissement visuel*. 5ème journées du pÃ¶le vision du grand parc communication homme-machine, pages 37–42, Mai 1996.
- [Marsot 06] J. Marsot & L. Claudon. *Etat de l'art des méthodes et outils utilisés pour l'évaluation en conception d'un poste de travail*. Rapport technique, INRS, Octobre 2006.
- [Maurel 98] W. Maurel & D. Thalmann. *Human shoulder modeling including scapulo-thoracic constraint and joint sinus cones*. Computers and Graphics, vol. 24, pages 203–218, 1998.
- [McAtamney 93] L. McAtamney & E. N. Corlett. *RULA : a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders*. Applied Ergonomics, vol. 24, no. 2, pages 91–99, Avril 1993.

- [McPhee 87] B. J. McPhee. *Work-related musculoskeletal disorders of the neck and upper extremities in workers engaged in light, highly repetitive work*. Proceeding of the International Symposium on Work-Related Musculoskeletal Disorders, pages 244–258, 1987.
- [Meredith 04] M. Meredith & S. Maddock. *Real-time inverse kinematics : the return of the Jacobian*. Rapport technique, Department of Computer Science, The University of Sheffield, 2004.
- [Meyer 97] J. Meyer, F. Howart, G. Didry & E. Turpin. *Movement repetitivity assessment*. Proceeding of XIII Triennial Congress of International Ergonomics Association, vol. 4, pages 201–204, 1997.
- [Morasso 81] P. Morasso. *Spatial control of arm movements*. Experimental Brain Research, vol. 42, pages 223–227, 1981.
- [MTM 96] MTM. *Methods Time Measurement*. Rapport technique, Association MTM Française, 1996.
- [Multon 08] F. Multon, R. Kulpa & B. Bideau. *MKM : a global framework for animating humans in virtual reality applications*. Presence : Teleoperation in Virtual Environments, vol. 17, no. 1, pages 17–28, 2008.
- [Murai 08] A. Murai, K. Yamane & Y. Nakamura. *Modeling and identification of human neuromusculoskeletal network based on biomechanical property of muscle*. Conference in Engineering in Medecine and Biology, Vancouver, BC, pages 3706–3709, October 2008.
- [Murray 94] R. M. Murray, S. Sastry & L. Zexiang. A mathematical introduction to robotic manipulation. CRC Press, 1994.
- [Nait Chabane 06] K. Nait Chabane. *Exploitation de la redondance pour la commande coordonnée d'un manipulateur mobile d'assistance aux personnes handicapées*. PhD thesis, Université d'Evry - Val d'Essone, Ecole doctorale Sitevry, 30 Novembre 2006.
- [Nakamura 91] Y. Nakamura. Advanced robotics : redundancy and optimization. Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [Nakamura 05] Y. Nakamura, K. Yamane, Y. Fujita & I. Suzuki. *Somatosensory computation for man-machine interface from motion-capture data and musculoskeletal human model*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, no. 1, pages 58–66, Février 2005.
- [Nakaoka 05] S. Nakaoka, A. Nakazawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, M. Morisawa & K. Ikeuchi. *Task model of lower body motion for a biped humanoid robot to imitate human dances*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 3157–3162, 2005.
- [NIOSH 91] NIOSH. *Work practice guide for manual lifting*. Rapport technique, Department of health and human service, 1991.
- [Online 12] Online. *L'encyclopédie du corps humain*. Rapport technique, www.lecorpshumain.fr, publié le 10 janvier 2012, 2012.
- [Papaxanthis 03] C. Papaxanthis, T. Pozzo & M. Schieppati. *Trajectories of arm pointing movements in the sagittal plane vary with both direction and speed*. Experimental Brain Research, vol. 148, pages 498–503, 2003.
- [Pappas 07] M. Pappas, V. Karabatsou, D. Mavrikios & G. Chryssolouris. *Ergonomic evaluation of virtual assembly tasks*. Digital Enterprise Technology, pages 1–9, 2007.

- [Park 74] K. S. Park & D. B. Chaffin. *A biomechanical evaluation of two methods of manual load lifting*. AIIE Transactions, vol. 6, no. 2, pages 105–113, 1974.
- [Park 97] F. C. Park & B. Ravani. *Smooth invariant interpolation of rotations*. ACM Transaction on Graphics, vol. 16, no. 3, pages 277–295, 1997.
- [Peczöli 99] I. Peczöli & G. Szabo. *Flexible office environment : psychological and ergonomic requirements for design landscape office*. Department of Ergonomics and Psychology, Technical University of Budapest, vol. 7, no. 2, pages 135–150, 1999.
- [Pontriaguine 74] L. Pontriaguine, V. Boltianski, G. Gamkrelidze & E. Michtchenko. *Théorie mathématique des processus optimaux*. Mir, 1974.
- [Ramsay 08] J. W. Ramsay, B. V. Hunter & R. V. Gonzalez. *Muscle moment arm and normalized moment contributions as reference data for musculoskeletal elbow and wrist joints models*. Journal of Biomechanics, vol. 42, pages 463–473, 2008.
- [Ramsis 13] Ramsis. *Applied Solution*. <http://www.appliedgroup.com/ramsis/>, 2013.
- [Renaud 96] M. Renaud. *Comment définir l’orientation d’un corps ?* Rapport technique, LAAS, Mars 1996.
- [Reynolds 04] H. M. Reynolds, N. P. Smith & P. J. Hunter. *Construction of an anatomically accurate geometric model of the forearm and hand musculo-skeletal system*. Proceedings of the 26th annual international conference of the IEEE EMBS, San Francisco, USA ; September 1-5, pages 1829–1832, September 2004.
- [Robin 07] V. Robin, L. Sabourin & G. Gogu. *Optimisation d’une cellule robotisée à architecture redondante : application au parachèvement de pièces de fonderie*. Conférence internationale CPI à Rabat, Maroc, 2007.
- [Robinson 88] J. C. Robinson, K. M. Robinette & G. F. Sehner. *User’s guide to accessing the anthropometric data base at the center for anthropometric research data*. Rapport technique, Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, 1988.
- [Roby-Brami 00] A. Roby-Brami, N. Bennis, M. Mokhtari & P. Baraduc. *Hand orientation for grasping depends on the direction of the reaching movement*. Experimental Brain Research, vol. 869, pages 121–129, 2000.
- [Rossetti 94] Y. Rossetti, C. Meckler & C. Prablanc. *Is there an optimal arm posture ? Deterioration of finger localization precision and comfort sensation in extreme arm-joint postures*. Experimental Brain Research, vol. 99, pages 131–136, 1994.
- [Rotella 95] F. Rotella & P. Borne. *Théorie et pratique du calcul matriciel*. Editions Technip, 1995.
- [Saab 11] L. Saab. *Generating whole body movements for dynamic anthropomorphic systems under constraints*. PhD thesis, Université Toulouse III, Paul Sabatier, France, 31 octobre 2011.
- [Salisbury 82] J. K. Salisbury & J. J. Craig. *Articulated hands : force control and kinematic issues*. International Journal of Robotics Research, vol. 1, no. 1, pages 4–17, 1982.
- [Samson 91] C. Samson, M. Le Borgne & B. Espiau. *Robot control : The task function approach*. Clarendon Press, Oxford, 1991.

- [SantosHuman 13] SantosHuman. *Société spécialisée dans la modélisation et la simulation d'activités humaines*. <http://www.santoshumaninc.com/>, 2013.
- [Sarlegna 09] F. R. Sarlegna, A. Przybyla & R. L. Sainburg. *The influence of target sensory modality on motor planning may reflect errors in sensori-motor transformations*. *Journal of Neuroscience*, vol. 164, no. 2, pages 597–610, Décembre 2009.
- [Savin 12] J. Savin. *Apports et limites des modèles anthropométriques numériques pour l'évaluation ergonomique de postes de travail*. Rapport technique, INRS - Hygiène et sécurité du travail, 2012.
- [Scilab 12] Scilab. *Scilab : Le logiciel open source gratuit de calcul numérique*. Scilab Entreprise (<http://www.scilab.org>), 2012.
- [Shoemake 85] K. Shoemake. *Animating rotation with quaternion curves*. *ACM*, vol. 19, no. 3, pages 245–254, Juillet 1985.
- [Siciliano 91] B. Siciliano & J. E. Slotine. *A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems*. *ICAR, 5th International Conference on Advanced Robotics*, vol. 2, pages 1211–1216, 1991.
- [Snook 70] S. H. Snook, C. H. Irvine & S. F. Bass. *Maximum weights and work loads acceptable to male industrial workers*. *American industrial hygiene association journal*, vol. 31, pages 579–586, 1970.
- [Snook 74] S. H. Snook & V. M. Ciriello. *Maximum weights and workloads acceptable to female workers*. *Journal of Occupational Medicine*, vol. 16, pages 527–534, 1974.
- [Snook 91] S. H. Snook & V. M. Ciriello. *The design of manual handling tasks : a revised tables of maximum acceptable weights and forces*. *Ergonomics*, vol. 34, no. 9, pages 1197–1213, 1991.
- [Soechting 81] J. F. Soechting & F. Lacquaniti. *Invariant characteristics of a pointing movement in man*. *Journal of Neuroscience*, vol. 1, no. 7, pages 710–720, 1981.
- [Spillmann 06] J. Spillmann, M. Becker & M. Teschner. *Efficient updates of bounding sphere hierarchies for geometrically deformable models*. 3rd Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation VRIPHYS, 2006.
- [Straumann 91] D. Straumann, T. Haslwanter, M. C. Hepp-Raymond & K. Hepp. *Lis-ting's law for eye, head and arm movements and their synergistic control*. *Experimental Brain Research*, vol. 86, pages 209–215, 1991.
- [Sugisaka 06] M. Sugisaka, T. Watanabe & M. Hara. *Motion control of arm using artificial muscles*. *SICE-ICASE International Joint Conference in Bexco, Korea, 18-21 October*, pages 4729–4732, 2006.
- [Summers 10] J. J. Summers, J. Lewis & H. Fujiyama. *Aging effects on event and emergent timing in bimanual coordination*. *Human Movement Science*, vol. 29, pages 820–830, 2010.
- [Svinin 05] M. Svinin, Y. Masui, Z. Luo & S. Hosoe. *On the dynamic version of the minimum hand jerk criterion*. *Journal of Robotic Systems*, vol. 22, no. 11, pages 661–676, 2005.
- [Taix 12] M. Taix, M. Tuan Tran & E. Guigon. *Generating human-like reaching movements with a humanoid robot : a computational approach*. *Journal of Computational Science*, pages 1–16, 2012.

- [Tikhonov 63] A. N. Tikhonov. *Solutions of incorrectly formulated problems and regularization method*. Soviet Math Dokl., vol. 4, pages 1035–1038, 1963.
- [Todorov 02] E. Todorov & M. I. Jordan. *Optimal feedback control as a theory of motor coordination*. Nature Neuroscience, vol. 5, no. 11, pages 1226–1235, 2002.
- [Tondou 00] B. Tondou & P. Lopez. *Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators*. IEEE Control Systems Magazine, pages 15–38, Avril 2000.
- [Torres 04] E. B. Torres & D. Zipser. *Simultaneous control hand displacements and rotations in orientation-matching experiments*. Journal of Neuroscience, vol. 96, pages 1978–1987, 2004.
- [Tran 09] M. T. Tran. *Approche neuro-robotique pour la commande de gestes d’atteinte sur les robots humanoïdes*. PhD thesis, Ecole Doctorale Système, Toulouse, France, 2009.
- [Trimmel 09] M. Trimmel, S. Fairclough & R. Henning. *Psychophysiology in ergonomics*. Applied Ergonomics, vol. 40, pages 963–964, 2009.
- [Trojanov 09] M. Trojanov. Cours de géométrie. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009.
- [Van Der Helm 94] F. C. T. Van Der Helm. *A finite element musculoskeletal model of the shoulder mechanism*. Journal of Biomechanics, vol. 27, no. 5, pages 551–553, 555–569, May 1994.
- [Vukobratovic 04] M. Vukobratovic & B. Borovac. *Zero moment point - thirty five years of its life*. International Journal of Humanoid Robotics, vol. 1, no. 1, pages 157–173, 2004.
- [Wang 99] X. Wang. *Three-dimensional kinematic analysis of influence of hand orientation and joint limits on the control of arm postures and movements*. Biological Cybernetics, vol. 80, pages 449–463, 1999.
- [Weston 97] R. L. Weston & A. Freivalds. *Development and validation of a CTD risk index*. Proceeding of XIII Triennial Congress of International Ergonomics Association, vol. 4, pages 123–125, 1997.
- [Wiley 97] D. J. Wiley & J. K. Hahn. *Interpolation synthesis of articulated figure motion*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 17, no. 6, pages 39–45, 1997.
- [Winter 90] D. A. Winter. Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley and Sons, 1990.
- [www.travailler mieux.gouv 12] www.travailler mieux.gouv. *Travailler mieux : la santé et la sécurité au travail*. Rapport technique, Ministère du travail, de l’emploi, de la formation professionnelle et du dialogue social, 2012.
- [Yoon 04] S. Yoon, B. Salomon, M. Lin & D. Manocha. *Fast collision detection between massive models using dynamic simplification*. Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2004.
- [Yoshikawa 84] T. Yoshikawa. *Analysis and control of robot manipulators with redundancy*. Proceedings of Robotics Research : The First International Symposium, pages 735–747, 1984.
- [Zatsiorsky 98] V. M. Zatsiorsky. Kinematics of human motion. Human kinetics, 1998.
- [Zghal 90] H. Zghal, R. V. Dubey & J. A. Euler. *Efficient gradient projection optimization for manipulators with multiple degrees of redundancy*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pages 1006–1011, 1990.

[Zlajpah 96]

L. Zlajpah. *Dexterity measures for optimal path control of redundant manipulators*. Proceeding of the 5th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube region, 1996.

Liste des symboles

Cette annexe permet de détailler l'ensemble des symboles et acronymes utilisés dans ce manuscrit.

$\alpha_{\text{Translation}}$: gain du filtre associé à la sous-tâche en translation

α_{Rotation} : gain du filtre associé à la sous-tâche en rotation

θ : amplitude de rotation

$\vec{\eta}$: axe de rotation dans la représentation (axe, angle)

\mathcal{B} : base vectorielle orthonormée directe

β : gain utilisé par la méthode de descente de gradient dans le cas d'évitement de butées

DI : index de linéarité dans $SO(3)$

$d(\mathbf{q}^0, \mathbf{q}^1)$: distance euclidienne entre deux postures

$d_w(\mathbf{q}^0, \mathbf{q}^1)$: distance riemannienne entre deux postures

$\delta \mathbf{q}$: incrément articulaire

$\delta \mathbf{q}^+$: solution particulière issue de la pseudo-inversion

$D_{r_{max}}$: écart maximal entre une trajectoire quelconque et sa géodésique

γ : poids associé à un critère

h : hauteur du mannequin ou de la personne

H : quaternion représenté par ses quatre paramètres (δ , h_1 , h_2 et h_3)

IM_1 : mesure globale de la géométrie de l'ellipsoïde de manipulabilité

IM_2 : mesure de l'excentricité de l'ellipsoïde de manipulabilité

IM_{dir} : mesure de la manipulabilité directionnelle

I_n : matrice identité de taille n

I : Matrice de taille 3×3 représentant l'inertie d'un solide

J : matrice Jacobienne de taille $m \times n$

$J^\#$: inverse généralisée de la matrice Jacobienne

J^+ : pseudo inverse de la matrice Jacobienne

κ : conditionnement d'une matrice

\vec{h} : vecteur contenant les paramètres h_1 , h_2 et h_3

$\text{Trace}(A)$: trace d'une matrice A
 A^t : transposée d'une matrice A
 l, m, n : coordonnées d'un point dans un repère affine \mathcal{R}
 $\lambda_{\text{Translation}}$: seuil de réglage associé aux valeurs singulières en translation
 $\lambda_{\text{Rotation}}$: seuil de réglage associé aux valeurs singulières en rotation
 LI : index de linéarité dans \mathbb{R}^3
 LT : longueur du chemin géodésique
 $\log m(A)$: logarithme matriciel d'une matrice A
 M : matrice de taille 3×3 représentant le moment d'inertie d'un corps à un point particulier
 T : matrice de transformation homogène ou matrice de passage
 R : matrice de rotation de taille 3×3
 μ : poids associé à un critère
 $offset$: offset inséré dans le calcul du filtre pour le cas de la rotation
 \mathbf{P} : vecteur représentant la position d'un point dans l'espace grâce aux coordonnées l, m, n
 \mathcal{R} : repère affine orthonormé direct
 \mathbf{q} : configuration du mannequin exprimée à l'aide des coordonnées articulaires ou généralisées
 $q_{i_{\min}}$: butée minimale de la liaison i
 $q_{i_{\max}}$: butée maximale de la liaison i
 $s(t)$: loi temporelle
 Σ : matrice diagonale de taille $m \times n$ contenant les valeurs singulières
 $SE(3)$: groupe spécial euclidien
 $SO(3)$: groupe spécial orthogonal ou groupe des rotations
 Θ : valeur courante de l'angle lors d'une évolution sur le chemin géodésique en rotation
 U : base orthonormale de l'espace opérationnel de taille $m \times m$ qui forme l'image de J
 \mathbf{U}_i : $i^{\text{ème}}$ vecteur de la base U et de taille m
 V : base orthonormale de l'espace généralisé de taille $n \times n$ qui forme le noyau de J
 \mathbf{V}_i : $i^{\text{ème}}$ vecteur de la base V et de taille n
 w_i : poid associé à la liaison i
 W : matrice de pondération diagonale définie positive de taille $n \times n$
 $x^*(s)$: trajectoire géodésique
 \mathbf{X} : vecteur représentant la situation d'un ou plusieurs corps, en position et/ou orientation
 \mathbf{X}_p : vecteur représentant la position d'un solide dans l'espace
 \mathbf{X}_r : vecteur représentant l'orientation d'un solide dans l'espace
 $y(s)$: trajectoire quelconque en fonction d'une loi temporelle
 \mathbf{z} : gradient d'ajustement vers une posture de référence dans le schéma priorisé
 σ_i : valeur singulière

C.8.3	Profil temporel du mouvement 3 pour chacun des sujets	65
C.8.4	Profil temporel du mouvement 4 pour chacun des sujets	66
C.8.5	Profil temporel du mouvement 5 pour chacun des sujets	67
C.8.6	Profil temporel du mouvement 6 pour chacun des sujets	68
C.8.7	Profil temporel du mouvement 7 pour chacun des sujets	69
C.9	Durée des mouvements pour chacun des sujets	70
C.10	Synchronisation entre translation et rotation	71
C.10.1	Synchronisation temporel du mouvement 2 pour chacun des sujets	71
C.10.2	Synchronisation temporel du mouvement 3 pour chacun des sujets	72
C.10.3	Synchronisation temporel du mouvement 5 pour chacun des sujets	73
C.10.4	Synchronisation temporel du mouvement 6 pour chacun des sujets	74
C.10.5	Synchronisation temporel du mouvement 7 pour chacun des sujets	75
D	Résultat d'imitation du geste	77
D.1	Evolution des valeurs singulières pour une contrainte de position	78
D.1.1	Cas du modèle cinématique global	78
D.1.2	Cas de la pile de tâche	79
D.2	Evolution des valeurs singulières avec contraintes couplées	80
D.2.1	Cas du modèle cinématique global	80
D.2.2	Cas de la pile de tâche pour la translation	81
D.2.3	Cas de la pile de tâche pour la rotation	82
D.3	Résultat pour la validation	82
D.3.1	Trajectoire spatiale de la main dans l'espace de la tâche pour le mouvement en étoile	83
D.3.2	Mesure du déformation de la main pour le mouvement en étoile	84

Lire
la seconde partie
de la thèse